МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

В. Ю. РОГИНСКИЙ

Полупроводниковые выпрямители





1957

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 273

В. Ю. РОГИНСКИЙ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1957 ЛЕНИНГРАД

В брошюре описываются полупроводниковые выпрямители: селеновые, меднозакисные (купроксные), германиевые и кремниевые. Кратко излагаются физические процессы в полупроводниковых диодах, описываются их конструкции и свойства, а также приводятся основные данные вентилей промышленного изготовления. Рассматриваются наиболее употребительные схемы выпрямителей и сглаживающих фильтров, а также приводится их расчет.

Брошюра рассчитана на подготовленных радиолюбителей и может быть использована при конструировании выпрямительных устройств.

Рогинский Владимир Юрьевич

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

* * *

Редактор *К. Б. Мазель* Технич. редактор *Л. Я. Медведев*

Сдано в набор 13/II 1957 г. Подписано к печати 30/V 1957 г.
Бумага $82 \times 108^1/_{32}$ Объем 4,92 п. л. Уч.-изд. л. 5,7.
Т-04596. Тираж 50 000 экз. Цена 2 р. 30 к. Заказ 113.

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство современных электрических станций вырабатывает электрическую энергию переменного тока. Наиболее важным преимуществом систем переменного тока перед системами постоянного тока является возможность трансформации одного напряжения в другое, более высокое или низкое. Так, например, при помощи трансформатора можно питать от одной и той же электрической сети несколько устройств, рассчитанных на разные напряжения: цепи накала электронных ламп напряжением 6,3 *в*, электрический чайник напряжением 127 *в*, электрический двигатель металлообрабатывающего станка напряжением 220 *в*.

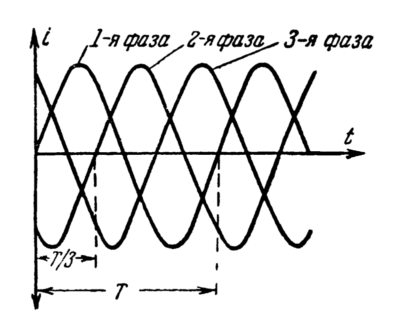


Рис. 1. График переменного трехфазного тока.

Во всех сетях переменного тока СССР изменение значения тока или напряжения во времени происходит по синусоидальному закону с частотой 50 *гц*. Такая частота называется промышленной частотой тока. В некоторых специальных устройствах используются маломощные установки переменного тока с повышенной частотой (400 и 800 *гц*).

Как правило, сети переменного тока, используемые для распределения электрической энергии, являются трехфазными и рассчитаны на напряжение 127 или 220 *в*. Изменение напряжения или тока в трехфазной сети с течением времени показано на рис. 1. Известно, что действующее значение напряжения между двумя фазами в $\sqrt{3}$ раз больше напряжения каждой фазы (между фазным и нулевым про-

водами). В заводских и фабричных сетях, а также в некоторых городах и селах часто используется напряжение 220 или 380 *в*.

Если для питания бытовых электрических приборов, мощных электродвигателей и других подобных потребителей электрической энергии можно обойтись переменным током, то для нормальной работы радиоприемников, телевизоров, радиостанций и большого числа всевозможных радиотехнических приборов и устройств автоматического управления станками и машинами требуется постоянный ток с различными величинами напряжения и потребляемой мощности. Использовать для этих целей аккумуляторы и батареи элементов, а также машинные генераторы постоянного тока оказывается в большинстве случаев нерациональным. Значительно проще преобразовать энергию переменного тока в энергию постоянного тока, причем для этих целей наилучшим преобразователем является в ы п р я м и т е л ь.

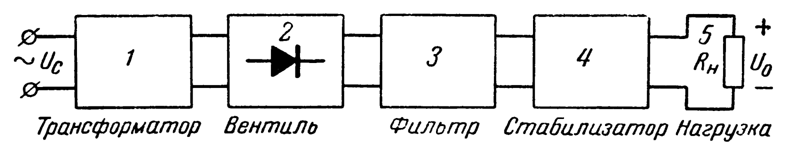


Рис. 2. Блок-схема выпрямительного устройства.

Блок-схема выпрямительного устройства показана на рис. 2. Назначение отдельных блоков схемы сводится к следующему:

1. С и л о в о й т р а н с ф о р м а т о р предназначен для трансформирования напряжения сети до такой величины, при которой можно получить заданное напряжение постоянного тока на выходе выпрямителя. Обычно в маломощных устройствах силовой трансформатор используется также и для понижения напряжения до величины, необходимой для питания накальных цепей электронных ламп радиоустройств.

2. Э л е к т р и ч е с к и й в е н т и л ь обеспечивает пропускание тока только в одном направлении, т. е. является собственно выпрямителем тока.

3. С г л а ж и в а ю щ и й ф и л ь т р уменьшает пульсации выпрямленного тока.

4. С т а б и л и з а т о р н а п р я ж е н и я п о с т о я н н о г о т о к а поддерживает постоянство величины напряжения на выходе выпрямителя при наличии колебаний напряжения на его входе.

5. Нагрузка является питаемым от выпрямителя устройством.

В некоторых выпрямительных устройствах может отсутствовать стабилизатор напряжения. В иных случаях также можно обойтись и без сглаживающего фильтра. Однако в этом случае выходное напряжение нельзя будет использовать для питания анодных цепей электронных ламп из-за большой пульсации.

Пульсирующий выпрямленный ток можно представить суммой постоянной и переменных составляющих (гармоник), частота которых кратна частоте переменного тока в сети, причем амплитуды переменных составляющих резко убывают с ростом частоты. Для большинства практических задач можно пренебречь малыми амплитудами более высоких частот и ограничиться только основной частотой пульсации.

Величина пульсации выпрямленного напряжения обычно характеризуется коэффициентом пульсации K_n (в процентах):

$$K_n = \frac{U_{n\,макс}}{U_0} 100,$$

где $U_{n\,макс}$ — амплитуда переменной составляющей напряжения с частотой пульсации;

U_0 — постоянная составляющая выпрямленного напряжения.

Допустимые значения коэффициента пульсации для различных видов нагрузки приведены в табл. 1.

Для выпрямления переменного тока используют различные типы приборов, обладающих свойством пропускать ток в одном направлении. Такие приборы называют электрическими вентилями. В качестве вентилей используют электронные, ионные и полупроводниковые приборы. Наиболее известными электронными и ионными приборами являются кенотроны, газотроны, тиратроны, ртутные выпрямительные колбы и игнитроны. Из полупроводниковых приборов наибольшее применение нашли селеновые, меднозакисные, германиевые и кремниевые диоды. В табл. 2 приведены сравнительные данные вентилей разных типов.

Приведенные в табл. 2 данные не учитывают таких показателей, как срок службы, температурный режим работы, механическая прочность и т. д. Приведенные данные также получаются неодинаковыми в зависимости от величины вы-

Таблица 1

Потребители электрической энергии постоянного тока и их характеристика

Потребители энергии	Электрические характеристики		
	Напряжение, *в*	Ток, *а*	Допустимый коэффициент пульсации напряжения $K_п$, %
Радиоприемники с полным питанием от сети переменного тока:			
а) Анодные цепи выходных ламп усилителя низкой частоты	240—450	0,04—0,1	Меньше 0,5
б) Анодные цепи ламп предварительного усиления, усилителей высокой частоты и т. п.	200—300	0,01—0,02	» 0,1
в) Обмотки возбуждения электродинамического громкоговорителя	60—240	0,015—0,04	» 20
г) Нити накала маломощных ламп с непосредственным накалом	2—6,3	До 5	» 0,5
Ламповый генератор малой мощности (лампы усилителя высокой частоты):			
а) Анодные цепи генератора .	До 450	До 0,1	» 0,1
б) Нити накала ламп	2—20	» 2	» 0,5
Усилитель высокой частоты коротковолнового передатчика 10—25 *вт* (лампы с непосредственным накалом):			
а) Анодные цепи	До 750	До 0,1	» 0,1
б) Нити накала ламп	4—20	» 5	» 0,5
Двигатель постоянного тока малой мощности	120—240	» 0,5	» 5

прямленного напряжения и тока. В настоящее время можно с уверенностью говорить о неоспоримых преимуществах полупроводниковых вентилей в устройствах относительно малой мощности (до 100 *вт*) с выпрямленным напряжением до 250 *в*. В ряде случаев оказывается также целесообразным применение полупроводниковых вентилей в устройствах с мощностью до 10 *квт* и выпрямленным напряжением до 1 500 *в*. Лучше всего определить целесообразность применения полупроводниковых вентилей при их сопоставлении

Таблица 2

Сравнительная оценка вентилей разных типов

Основные показатели вентиля (без учета трансформатора, фильтра и стабилизатора)	Типы вентилей				
	Кенотронный	Газотронный	Селеновый	Купроксный	Германиевый (плоскостной)
Коэффициент полезного действия, %	40—50	50—60	70—80	60—70	До 95
Вес вентиля на 1 *вт* мощности выпрямленного тока, *г*	3—10	5—15	8—15	15—25	1—2
Выпрямленное напряжение, *в*	250	250	250	100	250
Выпрямленный ток, *ма*	100	100	До 20 000	До 20 000	До 150

с другими вентилями при конкретно заданных режимах работы выпрямительного устройства.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

К полупроводникам относится большое количество веществ и элементов, которые по своим электрическим свойствам занимают промежуточное положение между проводниками и изоляторами. Удельное сопротивление проводников составляет 10^{-4}—10^{-5} *ом · см*; для изоляторов эта величина равна 10^{10}—10^{18} *ом · см*. Удельное сопротивление полупроводников колеблется в широких пределах (10—10^{10} *ом · см*).

Электрическое сопротивление полупроводников зависит от наличия в них примесей. Чтобы понять указанную зависимость, необходимо вкратце напомнить основные свойства твердого тела.

Для твердых тел, в том числе металлов и полупроводников, характерно кристаллическое строение, т. е. закономерное и упорядоченное расположение частиц в пространстве. Атомы твердого тела располагаются симметрично друг относительно друга, образуя кристаллическую решетку.

На рис. 3,*а* показана элементарная ячейка кристалла. Для большей конкретности здесь рассматривается кристалл четырехвалентного твердого тела, т. е. такого вещества, в каждом атоме которого имеются четыре внешних электрона. В таком кристалле все внешние электроны связаны с узлами кристаллической решетки. Это видно из рис. 3,*б*, где весь кристалл для большей наглядности связей между его отдельными частями показан в одной плоскости. Каждый кружок на рис. 3,*б* (узел кристаллической решетки) изображает атом с положительным зарядом. Все атомы связаны между собой силами взаимодействия при помощи внешних электронов. В таком кристалле все положительные и отрицательные заряды частиц связаны и свободных электронов, которые могли бы участвовать в переносе зарядов,

не имеется. Такой кристалл не может проводить электрический ток и является изолятором или полупроводником (беспримесным).

Основной отличительной чертой атомов металла является то, что электроны, находящиеся на внешних орбитах, связаны с ядром атома очень слабо и могут легко оторваться от своего атома. При потере электронов атом в целом оказывается заряженным положительно. В то же время другие атомы, присоединившие к себе лишние электроны, становятся отрицательно заряженными.

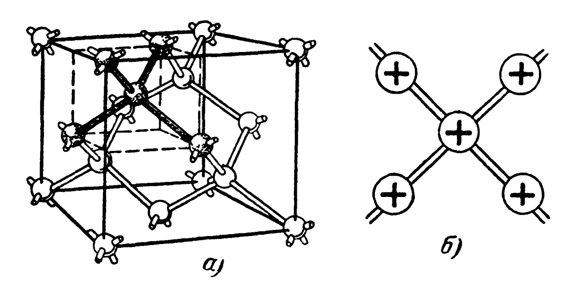


Рис. 3. Структура кристаллической решетки германия (*а*) и элементарная ячейка кристалла (*б*).

Если в кристаллическую решетку полупроводника внести примеси, у которых электроны наружных орбит слабо связаны с ядром и могут покинуть свой атом, то общее число электронов проводимости в этом полупроводнике увеличится и образованные свободные электроны, перемещаясь между узлами кристаллической решетки, смогут принять участие в переносе электрических зарядов, увеличивая электрическую проводимость полупроводника. Очевидно, что в описываемом случае валентность примесей должна быть более высокой, чем валентность основного (беспримесного) полупроводника. Так, например, при использовании четырехвалентного основного полупроводника примесь должна быть пятивалентной. В таком случае проводимость всего полупроводника (примесного) будет определяться избытком свободных электронов в кристалле, подобно тому, как это имеет место в металлах. Такие примесные полупроводники называются избыточными электронными полупроводниками, а их электрическая проводимость называется **электронной** или типа *n* (от слова «negative» — «отрицательный»). Технически важными избыточными электронными полупро-

водниками являются германий и кремний с примесью сурьмы, мышьяка или фосфора, а также большое число окислов металлов (ZnO, WO_3, Fe_2O_3, TiO_2, UO_2 и др.).

Примеси другого рода, обладающие большим сродством к электрону, т. е. способные принять на свою внешнюю орбиту один или несколько электронов, значительно облегчают отрыв электронов от наружной орбиты основных атомов кристалла. Оторвавшиеся электроны захватываются атомами примеси и закрепляются там. Атом основного полупроводника, с наружной орбиты которого ушел электрон, может «притянуть» на его место электрон с соседнего атома и т. д. В результате место, где имеется недостаток электрона, так называемая «электронная дырка», непрерывно и беспорядочно перемещается по всей кристаллической решетке от одного атома к другому. Если такой кристалл поместить во внешнее электрическое поле, то движение электронных дырок будет упорядочено и обусловит протекание тока. Так как электронные дырки обладают положительным зарядом (из-за недостачи заряда электрона), то они будут двигаться в направлении, противоположном движению электронов в полупроводнике с электронной проводимостью. В описанном полупроводнике электронные дырки будут являться носителями электрического заряда. Электрическая проводимость таких полупроводников называется дырочной или типа *p* (от слова «positive» — «положительный»).

Очевидно, что в примесном полупроводнике с дырочной проводимостью примеси должны иметь валентность, меньшую, чем валентность основного полупроводника. Так например, для получения проводимости типа *p* в четырехвалентном кристалле примесь должна быть трехвалентной. В качестве технически важных полупроводников типа *p* используются германий и кремний с примесями бора, алюминия, индия, а также ряд окислов металлов (CuO, Cu_2O и др.).

Примесные полупроводники с проводимостями типа *n* и типа *p* по-разному ведут себя при включении их в электрическую цепь и введении в них извне (по электрической цепи) электронов. Электрическая проводимость полупроводников типа *n* возрастает, поскольку увеличивается концентрация электронов в зоне проводимости. В полупроводнике типа *p* электрическая проводимость снижается, так как введенные электроны снижают концентрацию электронных дырок, часть которых рекомбинирует с введенными электронами.

2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Современные полупроводниковые диоды представляют собой два вида контактных соединений: полупроводника с металлом или двух полупроводников с проводимостями типов *n* и *p*. К диодам, в которых осуществляется контакт полупроводника с металлом, относятся: селеновые, меднозакисные (купроксные), а также германиевые и кремниевые с точечными контактами. Контакт между двумя полупроводниками с разными типами проводимости осуществляется в плоскостных германиезо-индиевых и кремниево-алюминиевых диодах.

Во всех этих случаях имеет место контактный переход из области с одной проводимостью в область с другой проводимостью. Такие контактные переходы называют для краткости переходами *n-p* или *p-n*.

Образование контактных переходов в диодах с плоскостными контактами между полупроводниками с проводимостями типов *n* и *p* очевидно. Несколько труднее представить себе образование контактных переходов в диодах с точечными контактами или с плоскостными контактами между полупроводником и металлом.

Упрощенное представление можно себе составить на основании следующего.

В точечных диодах, включающих в себя кристалл и пружинящую металлическую иглу, используются кристаллы, основной объем которых имеет один тип проводимости, а на поверхности кристалла имеются небольшие участки с проводимостями другого типа, образовавшиеся за счет примесей в кристалле. Участки обычно имеют малые размеры (пятна), и все строение поверхности кристалла имеет пятнистую структуру. В этом случае размеры острия контактной пружины должны быть меньшими, чем размеры «пятен», площадь которых обычно оценивается величиной приблизительно 10^{-6} *см*^{2} (диаметр приблизительно равен 0,01 *мм*); в противном случае *n-p* переход будет шунтироваться и выпрямляющее действие перехода будет нарушено. Этим, между прочим, можно объяснить известный радиолюбителям факт, что в кристаллических детекторах приходится «искать чувствительную точку».

Во втором случае, когда имеется плоскостной контакт между полупроводником и металлом, переходы *n-p* образуются в процессе изготовления (формования) диода. Для объяснения этого можно предположить, что между полупро-

водником и металлом имеется огромнейшее количество контактных игольчатых переходов, подобных переходам между кристаллом и острием металла.

Рассмотрим процессы, происходящие вблизи контактного перехода. Движение зарядов через *n-p* переход при отсутствии извне приложенного напряжения носит характер диффузии (перемещения) основных носителей зарядов. Диффузия зарядов обусловлена различной их концентрацией в полупроводниках типов *n* и *p*. Концентрация электронов в полупроводнике типа *n* выше, чем в полупроводнике типа *p*, и поэтому электроны диффундируют в область полупроводника типа *p*, заряжая пограничный слой этой области полупроводника отрицательно. Пограничный слой полупроводника типа *n*, потеряв электроны, заряжается положительно, как это показано на рис. 4,*а*. Вследствие аналогичной диффузии электронных дырок из области *p* в область *n* в пограничных слоях диода образуются дополнительные заряды с той же самой полярностью. В результате на границе полупроводника возникает двойной электрический слой (рис. 4,*б*), образующий потенциальный барьер (рис. 4,*в*), который противодействует дальнейшей диффузии через границу. Величина потенциального барьера устанавливается автоматически: она определяется концентрациями и энергиями заряженных частиц в областях *n* и *p*. В установившемся режиме через границу могут диффундировать только те заряженные частицы, которые обладают достаточной энергией для преодоления потенциального барьера. В установившемся режиме диффузионный ток компенсируется встречным током, образованным неосновными носителями зарядов, переходящими из одной области в другую под действием возникшего электрического поля в *n-p* переходе. При этом неосновные носители зарядов в области *p* (незна-

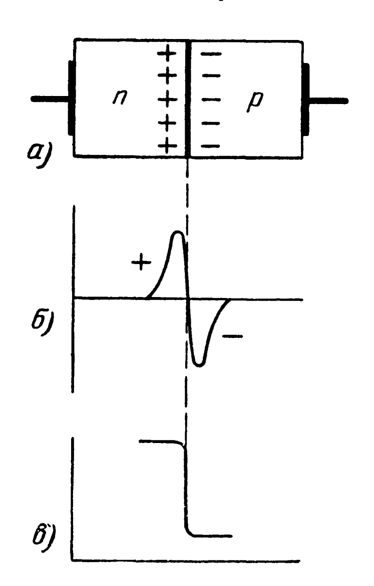


Рис. 4. Двойной электрический слой (*а*), распределение плотности заряда (*б*) и распределение потенциала (*в*) в диоде.

чительное количество свободных электронов) переходят в область *n*, а неосновные носители зарядов в области *n* (незначительное количество электронных дырок) перемещаются в область *p*. Результирующий ток через границу в установившемся режиме и при отсутствии извне приложенного напряжения равен нулю.

Вместе с образованием двойного электрического слоя происходит обеднение пограничного слоя полупроводников *n* и *p* основными носителями зарядов, вследствие чего такой слой обладает повышенным сопротивлением электрическому току.

Если присоединить полупроводниковый диод к источнику электрического тока так, как показано на рис. 5,*а*, то вследствие появившегося при этом электрического поля начнется

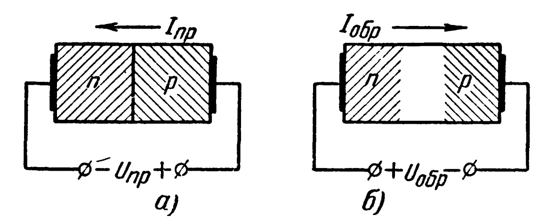


Рис. 5. Схемы включения диода в электрическую цепь.

а — в направлении пропускания тока; *б* — в направлении запирания.

перемещение основных носителей зарядов в областях *n* и *p* (соответственно электронов и дырок) от электродов к плоскости контакта. При этом обедненные пограничные слои пополняются притекающими основными носителями заряда, уменьшается сопротивление *n-p* перехода и понижается потенциальный барьер.

Свободные электроны, идущие в полупроводнике типа *n*, легко переходят (диффундируют) через потенциальный барьер. Процесс перехода электронов осуществляется тем легче, чем ниже потенциальный барьер, т. е. чем выше приложенное напряжение $U_{пр}$. В результате в цепи диода протекает ток $I_{пр}$, величина которого определяется напряжением $U_{пр}$.

Проводя аналогию с электронными лампами, можно отметить, что полупроводник типа *p* в диоде ведет себя подобно аноду, а полупроводник типа *n* — подобно катоду.

В случае включения диода в цепь по схеме рис. 5, *б*, когда на диод подается обратное напряжение $U_{обр}$, основные носители заряда будут перемещаться от плоскости контакта к электродам диска. Обедненные основными носителями заряда пограничные слои будут еще сильнее обедняться и расширяться, образуя в непосредственной близости от контактной поверхности запирающий слой, толщина которого оценивается примерно в 10^{-6} *см*. Одновременно с этим будет возрастать потенциальный барьер. В результате основные носители заряда не смогут участвовать в процессе электрической проводимости диода. В этом случае возникает обратный ток $I_{обр}$, обусловленный движением неосновных носителей заряда, перемещению которых потенциальный барьер не препятствует. Величина обратного тока мала ввиду незначительного количества неосновных носителей заряда в полупроводнике. Так как количество неосновных носителей зарядов зависит лишь от скорости их образования и скорости их рекомбинации, то обратный ток в некоторых пределах мало зависит от величины напряжения $U_{обр}$.

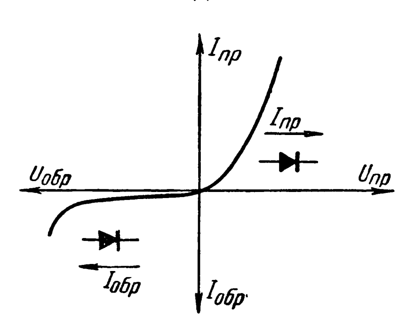


Рис. 6. Типовая вольтамперная характеристика полупроводникового выпрямителя.

Что касается направления прямого и обратного токов в диодах с точечными контактами, то оно зависит от типа проводимости в кристалле. В случае проводимости типа *n* прямой ток соответствует направлению от металла к кристаллу; если же в кристалле имеется проводимость типа *p*, то прямой ток соответствует направлению от кристалла к металлу, т. е. роль анода играет кристалл.

Сказанное выше о зависимостях прямого и обратного токов от приложенного напряжения лучше всего представлять в виде вольтамперной характеристики, приведенной на рис. 6. Такая характеристика является типичной для полупроводниковых диодов и может несколько видоизменяться в зависимости от особенностей данного типа диода, от температуры окружающей среды и других факторов, которые будут конкретно рассмотрены далее.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ И ВЕНТИЛИ

3. СЕЛЕНОВЫЕ ДИОДЫ И ВЕНТИЛИ

Устройство селеновых диодов и вентилей. Селеновые диоды широко используются для целей выпрямления в качестве вентилей. Контактную пару селенового диода составляют металл и слой селена [1], нанесенный на металлический электрод. Обычно к селену, идущему на изготовление диодов, добавляют в очень малом количестве иод или хлор. Эти примеси уменьшают сопротивление диода в направлении

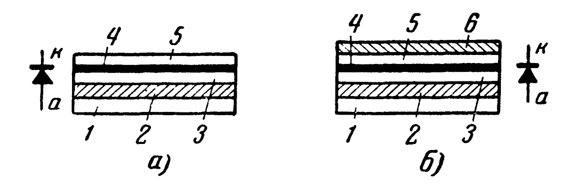


Рис. 7. Схематическое устройство селеновых диодов.

а — типа АВС; *б* — типа ТВС.
1 — алюминиевая подкладка; *2* — слой висмута; *3* — слой селена; *4* — запорный слой; *5* — сплав олова с кадмием; *6* — алюминиевая фольга.

пропускания тока и компенсируют действие других примесей, вызывающих повышение сопротивления диода.

Схематическое устройство простейшего селенового диода показано на рис. 7,*а*. Здесь электродом *а* (анод) является подкладка (нижний электрод) вместе с нанесенным на нее слоем селена. Электродом *к* (катод) служит верхний электрод, который иногда также называется слоем катодного сплава. Между слоем селена и катодным сплавом в процессе термической обработки образуется запорный слой, назначение которого описывалось выше.

---

[1] Металлоид селен является элементом VI группы периодической системы. Его порядковый номер 34, атомный вес 78,96, удельный вес 4,78. Температура плавления селена 217° С. Черный стекловидный аморфный селен размягчается при температуре 50—60° С и при более высоких температурах переходит в серый кристаллический селен. По свойствам селен напоминает серу.

Технический селен получается как отход в процессе электрического рафинирования меди, а также при камерном процессе производства серной кислоты из колчедана.

Подкладка диода штампуется из листов мягкой стали или алюминия толщиной 0,5—1,5 *мм*. Для вентилей, рассчитанных на малые токи, подкладка штампуется в виде дисков (таблет) диаметром 5 и 7,2 *мм*. Для более мощных вентилей применяется подкладка в виде шайб большего диаметра, а также прямоугольной формы.

Обработка подкладки до нанесения на нее слоя селена производится по-разному и зависит не только от материала подкладки (сталь или алюминий), но и от способа нанесения слоя селена. Как правило, алюминиевая подкладка после штамповки и рихтовки подвергается обработке на пескоструйном аппарате для создания шероховатой поверхности, позволяющей лучше удерживать покрывающий ее слой металла. Затем производятся обезжиривание алюминия и нанесение слоя висмута. Если применяется стальная подкладка, то, как правило, ее никелируют. Висмут наносится на подкладку в вакууме. Висмутирование и никелирование преследуют цель уменьшить переходное сопротивление между селеном и нижним электродом диода.

Нанесение слоя селена на подкладку производится одним из следующих способов. На горячую подкладку намазывается аморфный селен или на подкладке расплавляется порошкообразный селен. Затем подкладка с селеном прессуется для создания плотного и равномерного слоя селена. В последние годы этот способ почти не применяется и вытеснен более совершенной технологией, при которой слой селена напаривается в вакууме. При таком способе достигается большая равномерность толщины слоя, снижается расход селена, удлиняется срок службы и улучшаются электрические параметры диодов. Толщина слоя селена составляет примерно 0,065—0,085 *мм*.

Верхний электрод диода (катод) наносится на поверхность селена. Материалом катода служит сплав олова с кадмием. Иногда в сплав вводят, кроме того, висмут. Нанесение верхнего электрода осуществляется путем набрызгивания расплавленного металла при помощи специального металлизатора или осаждением (напариванием) слоя сплава в вакууме. Для предотвращения короткого замыкания между подкладкой и верхним электродом по боковой поверхности электродов катодный сплав наносится не на всю поверхность селена, вследствие чего уменьшается рабочая поверхность диода. Рабочая поверхность составляет примерно 75% поверхности подкладки для диодов малых и средних размеров.

Описанная технология изготовления селеновых диодов относится к обычным селеновым диодам на алюминиевой основе (типа АВС).

Наряду с диодами типа АВС изготовляются селеновые диоды с улучшенными электрическими параметрами, в частности диоды типа ТВС. Их схематическое устройство показано на рис. 7,*б*. У этих диодов поверх кадмиевого сплава наклеивается алюминиевая фольга. После склеивания диод прессуется.

Когда все технологические операции по изготовлению шайбы закончены, она подвергается формовке, которая состоит в том, что в течение примерно получаса через диод

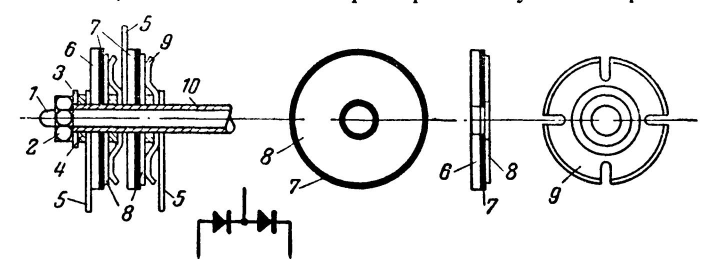


Рис. 8. Детали селенового столбика.

1 — монтажный болт; 2 — металлическая гайка; 3 — металлическая шайба; 4 — изоляционная шайба; 5 — контактный вывод; 6—подложка селенового вентиля; 7—слой селена; 8 — катодное покрытие; 9 — пружинящая контактная шайба; 10 — изолирующая трубка.

пропускается обратный ток с постепенным повышением приложенного обратного напряжения. При формовке несколько снижается относительная величина прямого тока и резко снижается величина обратного тока. В процессе формовки на наружной поверхности селена возникает тонкий слой селенистого кадмия, который обладает электронной проводимостью, а так как в селене имеется дырочная проводимость, то запорный слой в таком диоде создается между селеном и селенистым кадмием.

В практических установках для выпрямления переменного тока приходится в большинстве случаев соединять ряд селеновых диодов последовательно с целью получения более высокого выпрямленного напряжения и параллельно для выпрямления бо́льших токов, чем это возможно с одиночным диодом. В таких случаях в один конструктивный узел (выпрямительный столбик) входит до 60 диодов.

На рис. 8 показан пример сборки селеновых диодов в столбик. На монтажный болт *1* можно насадить нужное

число шайб. Контактные выводы *5* позволяют осуществить любое требуемое соединение диодов. Обычно таким способом собираются в столбики шайбы диаметром больше 11 *мм* или пластины прямоугольной формы; у пластин, одна сторона которых намного длиннее второй стороны, имеется несколько отверстий для монтажных болтов.

Диоды с малыми диаметрами дисков не могут собираться в столбики, как это показано на рис. 8, так как у них нет отверстия для монтажного болта. Такие диоды собираются в столбики при помощи обойм, в каждую из которых вмещается 50—60 таблет. Вид одной из таких обойм с таблеточными диодами показан на рис. 9,*а*.

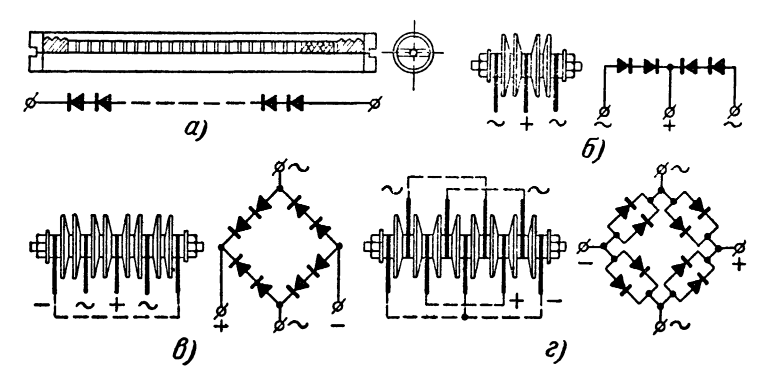


Рис. 9. Вид селеновых столбиков и схемы соединения диодов.

а — столбик с таблетами для включения в схему однотактного однофазного выпрямления; *б* — соединение диодов по схеме с выведенной средней точкой; *в* — по схеме однофазного моста; *г* — по схеме однофазного моста с последовательно-параллельным соединением диодов в каждом плече.

Наиболее распространенные схемы соединения выпрямительных столбиков (вентилей) и расположение диодов в них показаны на рис. 9. Размеры и количество диодов в столбике выбираются в соответствии с заданными значениями выпрямленного тока и напряжения.

Вольтамперная характеристика. Электрические свойства селенового диода определяются прежде всего его вольтамперной характеристикой (см. рис. 6), представляющей зависимости прямого и обратного токов от величин прямого и обратного напряжений. Часто при построении вольтамперных характеристик указываются не абсолютные значения прямого и обратного токов, а соответствующие плотности токов $\delta_{пр} = I_{пр}/см^2$ и $\delta_{обр} =$

$= I_{обр}/см^2$. Обычно вольтамперные характеристики снимаются на постоянном токе при определенных значениях температуры окружающей среды. Такие вольтамперные характеристики называют статическими.

Допустимые значения плотности прямого и обратного токов для селенового диода обычного типа составляют $\delta_{пр} = 50$ *ма/см*^{2} и $\delta_{обр} = 4$ *ма/см*^{2}. Более точно эти величины можно определить по данным, указанным ниже.

Зная величину падения напряжения на данном диоде, можно легко определить величину внутреннего сопротивления R_i и сопротивления обратному току $R_{обр}$ в виде:

$$R_i = \frac{U_{пр}}{I_{пр}} \quad \text{и} \quad R_{обр} = \frac{U_{обр}}{I_{обр}},$$

где $U_{пр}$ — прямое напряжение, приложенное к диоду;
$U_{обр}$ — обратное напряжение при данном значении обратного тока.

Пусть при $\delta_{пр} = 50$ *ма/см*^{2} приложенное к диоду прямое напряжение равно 1,2 *в*. Тогда внутреннее сопротивление диода

$$R_i = \frac{U_{пр}}{\delta_{пр} S_{раб}} = \frac{1,2}{50 \cdot 10^{-3} S_{раб}} = \frac{24}{S_{раб}} \text{ ом}.$$

Отсюда следует, что каждый квадратный сантиметр рабочей поверхности диода оказывает прямому току сопротивление 24 *ом*. Чем больше поверхность $S_{раб}$, тем меньше будет внутреннее сопротивление диода.

Сопротивление обратному току можно также узнать, пользуясь вольтамперной характеристикой, при помощи которой определяются нужные величины $U_{обр}$ и $I_{обр}$.

Классификация диодов. Естественно считать лучшими те селеновые диоды, которые обладают наименьшим сопротивлением прямому току и наибольшим сопротивлением обратному току. Однако такое определение качества селенового диода оказывается не совсем верным, так как существует «нижний» порог выпрямления, при котором сопротивления прямому и обратному токам почти одинаковы. Обычно это имеет место при плотностях тока порядка нескольких *мка/см*^{2}. Поэтому для большей определенности при оценке выпрямительных свойств диодов они разделяются на классы и группы, соответственно обозначаемые буквой и цифрой

(например: А-02, В-4 и т. д.). Буква означает класс диода в зависимости от величины обратного тока, а цифра — группу диода в зависимости от величины прямого напряжения (табл. 3 и 4).

Таблица 3

Группы диодов	4	3	2	1	01	02
Прямое напряжение не более, *в*	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95

Указанные в табл. 3 значения прямого напряжения измеряются при пропускании средних значений прямого тока, указанных в табл. 4.

Таблица 4

Класс диодов	Диоды на стальной подкладке диаметром, *мм*					Диоды на алюминиевой подкладке размерами, *мм*			
	18	25	35	45	100	60×60	75×75	90×90	100×100
Прямой ток, *а*									
А, Б, В	0,04	0,075	0,15	0,3	1,5	0,6	1,2	1,5	2,0
Наибольший обратный ток, *ма*									
В	5	7	9	12	60	20	30	40	50
Б	—	—	12	18	85	50	75	100	125
А	—	—	—	—	150	—	—	—	—

Указанные в табл. 4 значения обратного тока измеряются при подаче на диод обратного напряжения с амплитудой 25 *в*. Диоды, имеющие меньший обратный ток, являются лучшими (класс В). Сопоставляя класс и группу диода, видно, что лучшим диодом является В-4, а худшим — А-02.

Температура окружающей среды сильно сказывается на выпрямляющих свойствах селенового диода. Это видно из семейства статических вольтамперных характеристик, приведенных на рис. 10. Увеличение температуры окружающей среды приводит к уменьшению сопротивления прямому току. Можно считать, что в пределах +20—+60° С сопротивление прямому току уменьшается на 1% первоначального при повышении температуры на 1° С. Снижение температуры окружающей среды приводит к увеличению сопротив-

ления прямому току. Это справедливо в диапазоне температур от —40 до +60°C при напряжении $U_{пр} < 2$ *в*.

Характер влияния температуры окружающей среды на сопротивление обратному току определяется величиной напряжения, приложенного к диоду. При напряжениях $U_{обр} = 10—20$ *в* сопротивление обратному току увеличивается по

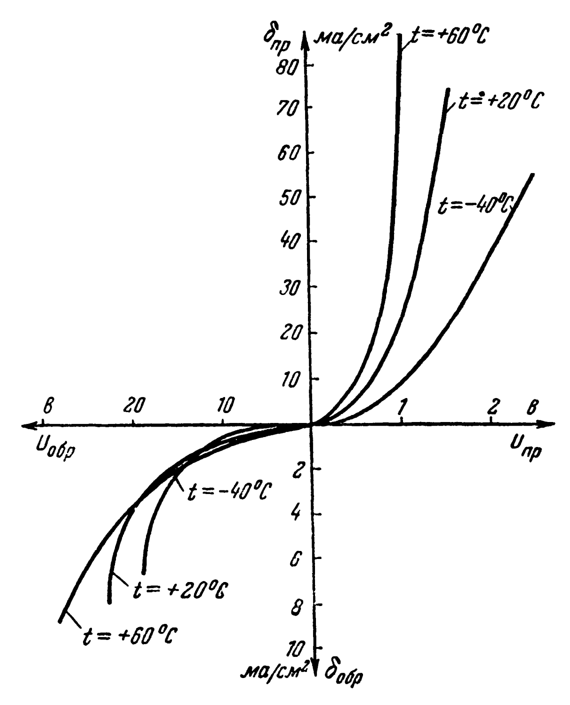


Рис. 10. Семейство статических вольтамперных характеристик селенового диода.

мере повышения температуры. При малых напряжениях, наоборот, имеет место уменьшение сопротивления с ростом температуры.

Сказанное о температурной зависимости сопротивления относится к диодам, изготовленным по старой технологии. В настоящее время имеются опытные образцы селеновых диодов, у которых температурная зависимость сопротивления значительно снижена.

Перегрузка диодов по току приводит к повышению падения напряжения на них и к перегреву диодов. Кратковре-

менные перегрузки (в 2—5 раз), повторяющиеся с большими интервалами (например, перегрузки длительностью 10 *сек*, повторяющиеся через каждые 10 *мин*), выдерживаются селеновым выпрямителем безболезненно. Нагрузка импульсного характера с определенной частотой повторения может быть учтена при расчете действующего значения тока выпрямителя.

Расформовка диода заключается в том, что сопротивление запорного слоя (т. е., иными словами, сопротивление обратному току) уменьшается с течением времени. Это происходит главным образом при длительном пропускании только прямого тока, а также при долговременном хранении селеновых выпрямителей без использования. При включении выпрямителя после длительного хранения рекомендуется вначале подавать неполное рабочее напряжение, а затем постепенно повышать его. При этом по существу производится повторная операция формовки. В этом случае лучше всего подключать к диоду напряжение переменного тока.

Старение селеновых выпрямителей состоит в постепенном увеличении сопротивления прямому току с течением времени. Процесс старения селеновых выпрямителей происходит наиболее заметно в первые 1 000—2 000 *ч* их работы. В нормальном режиме работы выпрямителей сопротивление прямому току может возрасти на 25—30% первоначальной величины. Старение выпрямителей имеет место также и при их хранении.

Условным сроком службы селенового выпрямителя называют время его непрерывной работы, в течение которого напряжение на выходе выпрямителя снижается на 10% при неизменном напряжении, подводимом к выпрямителю. Селеновые выпрямителя могут быть также использованы и по истечении условного срока службы, если имеется возможность компенсировать возросшее падение напряжения на вентиле выпрямителя за счет увеличения подводимого к выпрямителю напряжения. Срок службы селеновых диодов составляет 5 000—15 000 *ч*.

Пробой селеновых диодов заключается в тепловом разрушении части селенового слоя и катодного сплава под действием больших обратных токов, вызванных большими обратными напряжениями. Обычно пробой происходит при обратных напряжениях с амплитудой 50—80 *в* на каждый диод. Пробой диода сопровождается искрой, а также оплавлением селена и части катодного сплава. Если причина пробоя устранена, то выпрямитель может продолжать рабо-

тать, так как пробитое место в диоде заплавляется аморфным селеном, не проводящим тока. Иногда при перегреве выпрямителя расплавленный электрод (катодный сплав) заливает промежуток между электродами и тем самым замыкает диод накоротко. В этом случае для дальнейшей нормальной работы вентиля необходимо удалить расплавленный металл.

Емкость селенового диода. Опыт показывает, что в цепи с повышенной частотой тока селеновый диод ведет себя, как система, обладающая в запирающем направлении емкостью с параллельно включенным сопротивлением. В соответствии с этим диод можно представить в виде эквивалентной схемы, приведенной на рис. 11. Емкость C обусловлена наличием между металлом и полупроводником (селеном) тонкой изолирующей прослойки (запорный слой). Величина емкости составляет 0,01—0,02 *мкф/см²* и зависит от напряжения, приложенного к диоду.

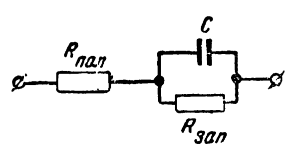


Рис. 11. Эквивалентная схема диода.

Емкость выпрямительного диода как бы шунтирует запорный слой ($R_{зап}$). Это приводит к дополнительным потерям мощности в слое полупроводника ($R_{пол}$ эквивалентной схемы) и к уменьшению выпрямленного напряжения. Влияние собственной емкости диода сказывается на работе выпрямителя тем сильнее, чем выше частота выпрямленного тока.

Усталость (ползучесть) выпрямителей сказывается в том, что наблюдается возрастание обратного тока под воздействием неизменного по величине обратного напряжения, причем увеличение обратного тока не связано с температурным режимом. Как правило, в селеновых выпрямителях явление усталости наблюдается только при некоторых нарушениях технологического процесса изготовления.

Усталость имеет большое значение и резче проявляется в диодах, используемых в цепях постоянного тока. В этих случаях наибольшее допустимое обратное напряжение снижается примерно на 30—40% по сравнению с допустимым значением обратного напряжения для диодов, включаемых в цепи переменного тока.

Условия охлаждения селеновых диодов. Если температура окружающей среды выше +35° С, то нагрузка выпря-

мителя должна быть снижена в соответствии с данными табл. 5.

Таблица 5

Рекомендуемые токи и напряжения для селеновых выпрямителей при повышенной температуре окружающей среды

Температура окружающей среды, °С	Рекомендуемая нагрузка, % нормальных значений	
	по току	по напряжению
До + 35	100	100
40	83/100	100/80
45	67/83	100/80
50	46/67	100/80
55	47/67	80/50
60	30/47	80/60
65	30/47	60/40
70	30	40

Примечание. Уменьшение нагрузки может быть сделано по току или напряжению соответственно данным, указанным в числителях или знаменателях таблицы.

Снижение нагрузки селеновых выпрямителей при повышенной температуре вызвано тем, что предельная температура нагрева обычных селеновых диодов составляет около +70° С. Более теплостойкими являются селеновые диоды типа ТВС. Если по условиям эксплуатации выпрямитель должен работать с перегрузкой, то необходимо улучшить условия охлаждения диодов. В таких случаях при сборке диодов в столбики увеличивают промежутки между диодами, создают искусственное охлаждение за счет применения принудительного обдува воздухом или помещают выпрямительный столбик в бак с трансформаторным маслом.

Низкая температура окружающей среды для селеновых выпрямителей не опасна. Селеновые выпрямители могут быть использованы при температуре до —40° С. Однако при этом заметно возрастают потери, обусловленные увеличением сопротивления прямому току. Известно, что при работе выпрямителя с температурой окружающей среды —60° С отдаваемая мощность падает на 30% по сравнению с мощностью, отдаваемой при температуре +20° С.

Параметры селеновых диодов и вентилей. К электрическим параметрам селеновых диодов и вентилей относятся следующие:

1. Допустимая плотность прямого тока около 50 *ма/см²* или величина прямого тока при данной рабочей поверхности диода. Часто также указывают среднее значение выпрямленного тока при данной схеме выпрямления и определенном характере нагрузки. Последние данные можно использовать для ориентировочного выбора типа вентиля

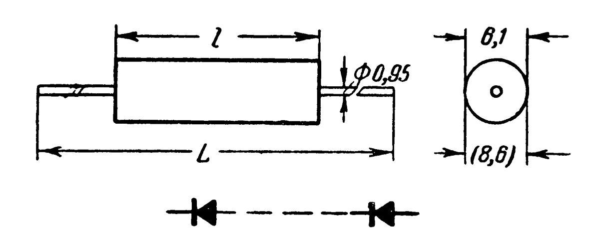


Рис. 12. Конструктивные размеры селеновых вентилей из таблет диаметром 5 и 7,2 *мм*.

2. Допустимая величина амплитуды обратного напряжения для диода (около 25 *в*) или допустимая величина напряжения, подводимого к вентилю, состоящему из определенного числа последовательно соединенных диодов. Часто также указывается величина выпрямленного напряжения в данной схеме выпрямления при активном характере нагрузки выпрямителя. Последние данные можно использовать для ориентировочного выбора типа вентиля.

Приняты следующие обозначения селеновых вентилей:

ВС — на стальной подкладке;

АВС — на алюминиевой подкладке;

ТВС — на алюминиевой подкладке серии Т.

Ниже приводятся данные некоторых селеновых вентилей.

Конструкция селеновых столбиков из таблет диаметром 5 и 7,2 *мм* на алюминиевой подкладке показана на рис. 12. Данные этих столбиков приведены в табл. 6 и 7.

Приведенные в табл. 6 и 7 данные соответствуют работе вентилей в однофазной однотактной схеме выпрямления с активной нагрузкой при выпрямленном токе $I_0 = 1{,}2$ *ма* для таблет диаметром 5 *мм* и $I_0 = 6$ *ма* для таблет диаметром 7,2 *мм*.

Таблица 6

Данные селеновых столбиков из таблет диаметром 5 *мм*

Тип столбика	Подводимое переменное напряжение (действующее значение) U_n, *в*	Выпрямленное напряжение U_0, *в*	Размеры, *мм*		Вес, *г*
			L	*l*	
АВС-1-30 . . .	30	10,5	90	20	3,5
АВС-1-60 . . .	60	21	93	23	3,8
АВС-1-90 . . .	90	32	96	26	4,0
АВС-1-120 . .	120	42	99	29	4,3
АВС-1-150 . .	150	53	102	32	4,5
АВС-1-210 . .	210	74	108	38	5,0
АВС-1-270 . .	270	95	114	44	5,5
АВС-1-330 . .	330	117	120	50	6,0
АВС-1-420 . .	420	148	129	59	7,0
АВС-1-510 . .	510	180	137	67	8,0
АВС-1-600 . .	600	212	146	76	9,0
АВС-1-720 . .	720	254	158	88	10,5
АВС-1-840 . .	840	297	170	100	12,0
АВС-1-1000 . .	1 000	355	186	116	14,0

Таблица 7

Данные селеновых столбиков из таблет диаметром 7,2 *мм*

Тип столбика	Подводимое переменное напряжение (действующее значение) U_n, *в*	Выпрямленное напряжение U_0, *в*	Размеры, *мм*		Вес, *г*
			L	*l*	
АВС-6-30 . . .	30	10,5	92	22	4
АВС-6-60 . . .	60	21	95	25	4,5
АВС-6-90 . . .	90	32	98	28	5
АВС-6-120 . .	120	42	101	31	5,5
АВС-6-150 . .	150	53	103	34	6
АВС-6-210 . .	210	74	109	39	7
АВС-6-270 . .	270	95	114	44	8
АВС-6-330 . .	330	117	120	50	9
АВС-6-420 . .	420	148	128	58	10,5
АВС-6-510 . .	510	180	137	67	12
АВС-6-600 . .	600	212	145	75	13,5
АВС-6-720 . .	720	254	156	86	15,5
АВС-6-840 . .	840	297	167	97	17,5
АВС-6-1000 . .	1 000	355	182	112	20

Конструкции и некоторые схемы соединения селеновых столбиков из шайб показаны на рис. 13. Данные некоторых столбиков из шайб и прямоугольных пластин приведены в табл. 8—11.

Таблица 8

Данные некоторых селеновых столбиков из шайб диаметром 45 *мм* на стальной основе

Тип столбика	Подводимое переменное напряжение U_n, *в*	Выпрямленные напряжение U_0, *в*	Выпрямленные ток I_0, *а*	Схема соединения	Расположение выводов	Количество диодов последовательно	Количество диодов параллельно	Количество диодов всего	Размеры, *мм* L	Размеры, *мм* l
ВС-45-136	30	10	0,3	1	В	1	—	2	55	32
ВС-45-83	120	42	0,3	1	Б	4	—	8	90	65
ВС-45-122	15	5	0,6	2	В	1	—	2	55	32
ВС-45-180	120	80	0,6	3	Б	8	—	32	225	199

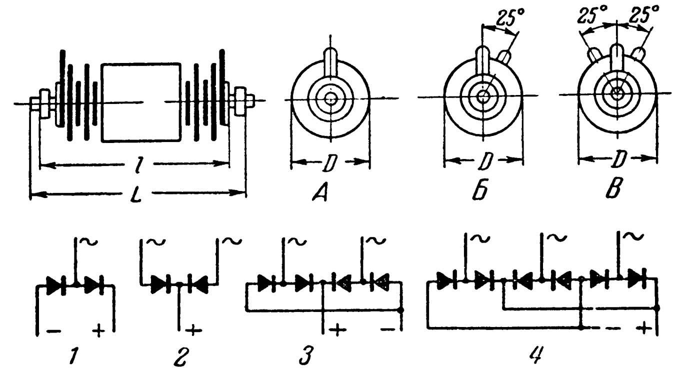


Рис. 13. Конструктивное оформление селеновых столбиков и схемы соединения диодов в столбиках.

Таблица 9

Данные некоторых селеновых столбиков из пластин 75×75 *мм* на алюминиевой основе

Тип столбика	Подводимое переменное напряжение U_n, *в*	Выпрямленные напряжение U_0, *в*	Выпрямленные ток I_0, *а*	Схема соединения	Расположение выводов	Количество диодов последовательно	Количество диодов параллельно	Количество диодов всего	Размеры, *мм* L	Размеры, *мм* l
АВС-75-38	15	5	2,4	2	В	1	—	2	90	57
АВС-75-41	30	20	2,4	3	В	2	—	8	115	84
АВС-75-43	45	30	2,4	3	Б	3	—	12	145	111
АВС-75-45	60	40	2,4	3	Б	4	—	16	170	138
АВС-75-51	105	70	2,4	3	Б	7	—	28	250	219

Таблица 10

Данные некоторых селеновых столбиков серии Т из шайб диаметром 18 *мм* на алюминиевой основе

Тип столбика	Подводимое переменное напряжение U_n, *в*	Выпрямленные		Схема соединения	Расположение выводов	Количество диодов			Размеры, *мм*	
		напряжение U_0, *в*	ток I_0, *а*			последовательно	параллельно	всего	*L*	*l*
ТВС-18-12	60	22	0,04	1	В	1	—	2	50	28
ТВС-18-32	120	44	0,04	1	Б	2	—	4	55	35
ТВС-18-112	360	132	0,04	1	А	7	—	14	90	68
ТВС-18-13	30	11	0,075	2	В	1	—	2	50	28
ТВС-18-154	120	88	0,075	3	Б	4	—	16	95	75
ТВС-18-314	240	176	0,075	3	Б	8	—	32	150	128

Таблица 11

Данные некоторых селеновых столбиков серии Т из пластин 40×40, 75×75 и 100×100 *мм* на алюминиевой основе

Тип столбика	Подводимое переменное напряжение U_n, *в*	Выпрямленные		Схема соединения	Расположение выводов	Количество диодов			Размеры, *мм*	
		напряжение U_0, *в*	ток I_0, *а*			последовательно	параллельно	всего	*L*	*l*
ТВС-40-12	60	22	0,3	1	В	1	—	2	60	36
ТВС-40-32	120	44	0,3	1	Б	2	—	2	70	50
ТВС-40-152	480	176	0,3	1	А	8	—	16	155	133
ТВС-40-312	960	352	0,3	1	А	16	—	32	265	243
ТВС-40-13	30	11	0,6	2	В	1	—	2	60	36
ТВС-40-154	120	88	0,6	3	Б	4	—	16	155	133
ТВС-40-314	240	176	0,6	3	Б	8	—	32	265	243
ТВС-75-32	120	44	1,2	1	В	2	—	4	95	65
ТВС-75-112	360	132	1,2	1	А	7	—	14	180	149
ТВС-75-272	840	308	1,2	1	А	14	—	28	295	266
ТВС-75-274	210	154	2,4	3	Б	7	—	28	295	266
ТВС-75-56	25	27	3,6	4	В	1	—	6	110	83
ТВС-75-176	75	81	3,6	4	В	3	—	18	215	184
ТВС-100-32	120	44	2,0	1	Б	2	—	4	100	69
ТВС-100-992	120	44	8,0	1	В	2	5	20	260	231
ТВС-100-234	180	132	4,0	3	Б	6	—	24	300	268
ТВС-100-836	25	27	19,0	4	В	1	4	24	310	278

Все данные селеновых столбиков серии Т относятся к температуре окружающей среды +35° С. Частота выпрямляемого тока — до 500 *гц*.

Значения выпрямленных напряжений и токов в табл. 8—11 соответствуют работе вентилей в схемах выпрямителей с активной нагрузкой.

При сборке селеновых диодов в столбики следует помнить, что применение в параллельных ветвях диодов разных групп может привести к неравномерному нагреванию и перераспределению тока в вентилях, а применение в последовательном соединении диодов разных классов — к неравномерному распределению обратных напряжений, к перенапряжению на части вентилей и возможному их пробою.

4. МЕДНОЗАКИСНЫЕ (КУПРОКСНЫЕ) ДИОДЫ И ВЕНТИЛИ

Устройство меднозакисных диодов и вентилей. Меднозакисный (купроксный) диод представляет собой медную шайбу, диск или пластину, покрытые путем термической обработки слоем закиси меди. При этом между наружным слоем закиси меди и самой медью образуются запорный слой и внутренний слой закиси меди.

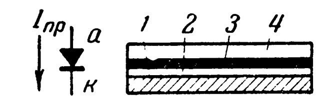


Рис. 14. Схематическое устройство меднозакисного диода.

1 — медь; 2—закись меди+медь; 3— запорный слой; 4—закись меди.

Два слоя закиси меди, расположенные по обе стороны запорного слоя, создаются следующим образом. Когда медная пластина нагревается для образования слоя закиси меди, то со стороны меди этот слой насыщается атомами меди и в нем образуется преимущественно электронная проводимость (типа *n*); наружная же поверхность слоя закиси меди имеет примесь атомов кислорода и в этой части слоя образуется преимущественно дырочная проводимость (типа *p*).

Таким образом, своеобразным анодом диода является верхний электрод с наружным слоем закиси меди, а катодом является нижний электрод — медная пластина с внутренним слоем закиси меди. Схематическое устройство такого диода показано на рис. 14.

Нижний электрод меднозакисного диода штампуется из электролитически очищенной красной меди, содержащей весьма малое количество примесей (не более 0,02—0,04%). Толщина медной ленты, из которой штампуются диски или пластины, лежит в пределах 0,8—1,5 *мм* в зависимости от размеров пластин. Отштампованные диски тщательно обез-

жириваются и подвергаются отжигу при температуре 600° С в вакууме в течение 3 *ч*. Для образования слоя закиси меди диски (пластины) помещаются на 10—15 *мин* в печь с температурой 1 020—1 040° С. При этом диски укладываются на жаростойкие стальные подкладки с тем, чтобы закись меди образовалась только с одной стороны пластины. Температура печи строго контролируется, так как уже при температуре 1 080° С медь плавится. Толщина образующегося слоя закиси меди составляет примерно 0,1 *мм*.

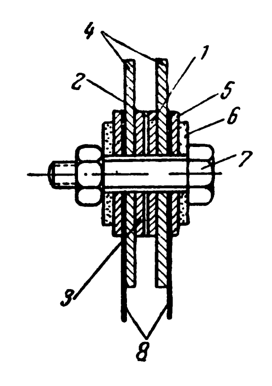


Рис. 15. Меднозакисный вентиль.

1 — медная пластина (шайба); *2* — слой закиси меди; *3* — свинцовая шайба; *4* — радиаторные пластины; *5* — металлическая прижимная шайба; *6* — изолирующая шайба; *7* — стяжной болт; *8* — контактные выводы от электродов вентиля.

Вентильные свойства меднозакисного диода во многом зависят от технологии производства, в частности, очень важное значение имеет режим охлаждения нагретых медных пластин. Обычно из печи с температурой 1 020—1 040° С их переносят в печь с температурой 450—600° С, в которой пластины выдерживаются 10—15 *мин*. Затем их быстро вынимают и охлаждают проточной водой.

При постепенном охлаждении пластин на поверхности слоя закиси меди образуется плохо проводящий слой окиси меди, который удаляется погружением дисков в 30-процентный раствор азотной кислоты.

Для создания контакта с наружным слоем закиси меди и для предохранения этого слоя от повреждения используется мелко размолотый графит, скрепленный шеллаком. После просушки слоя графита на него наносится металлический слой, подобный катодному сплаву в селеновых диодах. В прежних конструкциях вместо катодного сплава использовалась прижимная свинцовая пластина.

Подобно селеновым диодам меднозакисные диоды также собираются в выпрямительные столбики (вентили). Их сборка производится примерно так же, как и селеновых. В старых конструкциях меднозакисных вентилей существенным отличием от селеновых вентилей было наличие радиаторных пластин, увеличивающих площадь охлаждения электродов. Такой меднозакисный вентиль показан в собранном виде на рис. 15. Современные меднозакисные вентили чаще всего собираются в герметизированных блоках, рассчитанных на

выпрямление малых токов (например, для измерительных приборов). Такие блоки собираются из шайб или таблет с наружным диаметром 2—40 *мм.*

Электрические свойства меднозакисных диодов во многом схожи со свойствами селеновых диодов. На рис. 16 представлено семейство статических вольтамперных характеристик меднозакисных диодов. С повышением температуры окружающей среды сопротивление диода прямому току

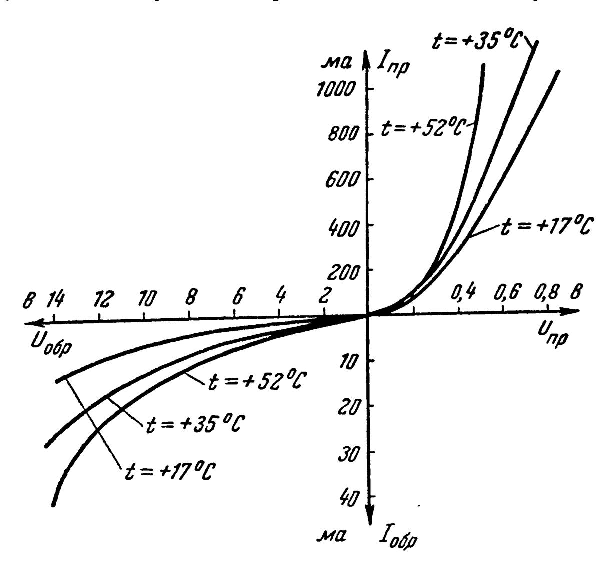


Рис. 16. Семейство статических вольтамперных характеристик меднозакисного диода.

убывает, при понижении температуры оно возрастает, и при температуре примерно —30° С выпрямитель перестает работать.

Сопротивление меднозакисного вентиля обратному току заметно падает с повышением температуры окружающей среды. Это ограничивает возможности использования меднозакисных выпрямителей при температуре окружающей среды выше +50° С.

Допустимые плотности токов и обратные напряжения меднозакисного вентиля весьма сильно зависят от условий работы и конструкции столбика, в который собираются отдельные диоды. Плотность прямого тока может быть выбрана в пределах 50—150 *ма/см²* в зависимости от условий

охлаждения. При нормальной нагрузке и хороших условиях охлаждения на каждый диод можно допускать обратное напряжение 9—12 *в*. При повышенной температуре окружающей среды обратное напряжение снижается до 2—6 *в*.

У меднозакисных вентилей резко выражен процесс старения, состоящий в повышении сопротивления прямому току с течением времени. Рост сопротивления особенно заметен в первый период использования изготовленного диода. За первые 1 500—2 000 *ч* работы диода его сопротивление прямому току увеличивается на 40—50%, а сопротивление обратному току уменьшается примерно на столько же. При дальнейшей работе диода изменение сопротивления происходит медленнее. Процесс старения протекает интенсивнее при более высоких температурах окружающей среды.

Чтобы сделать параметры меднозакисных диодов более стабильными, производят искусственное старение изготовленных диодов. Для этого их выдерживают в течение 24 *ч* при температуре +50—55° С. Для меднозакисных диодов, предназначенных для использования в измерительных устройствах, процесс искусственного старения проводится более длительное время. Такие диоды подвергают старению при +90° С в течение десятков суток (вплоть до нескольких месяцев).

Меднозакисным вентилям в большей мере, чем селеновым, свойственна усталость (ползучесть).

Электрическая емкость меднозакисных диодов оценивается примерно теми же значениями величин, что и для селеновых диодов, т. е. 0,01—0,02 *мкф/см²*. В широко используемых меднозакисных вентилях в виде таблет диаметром до 5 *мм* емкость настолько мала, что их можно применять в цепях тока с частотой до 20 *кгц*.

Перегрузка меднозакисных диодов по току приводит к их перегреву и снижению допустимого обратного напряжения. Поэтому с повышением температуры окружающей среды рекомендуется, как и для селеновых выпрямителей, уменьшать ток нагрузки или снижать напряжение.

При подборе отдельных диодов для работы их в схемах при последовательном и параллельном соединениях следует особо обращать внимание на одинаковость вольтамперных характеристик диодов. Если включить параллельно несколько диодов с разными сопротивлениями прямому току, то общая нагрузка выпрямителя будет распределена между диодами неравномерно. Диоды с меньшими сопротивлениями прямому току будут перегружаться, сильнее нагревать-

ся и стариться. В результате перегруженные диоды преждевременно выйдут из строя. При последовательном соединении диодов важно, чтобы обратное напряжение на каждом диоде было одинаковым. Допустимый разброс значений обратного напряжения не должен превышать 2—3 *в*, в противном случае возможен электрический пробой отдельных диодов.

На надежность работы меднозакисного выпрямителя сильно влияют влажность и пары кислот. При проникновении влаги к слою закиси меди происходит электролитический пробой выпрямителя. Для защиты выпрямителей от паров воды и кислот применяют различные лакокрасочные покрытия. В ряде случаев может оказаться целесообразным помещение выпрямителей в сосуд с трансформаторным маслом.

Параметры меднозакисных диодов и вентилей. Основными параметрами меднозакисных вентилей, как и селеновых, являются допустимая плотность прямого тока (около 50 *ма/см*^{2}) и допустимая амплитуда обратного напряжения диода (около 12 *в*). Для готовых выпрямителей обычно приводятся данные, характеризующие весь выпрямитель.

Таблица 12

Тип столбика	Количество диодов в столбике			Напряжение на входе, *в*	Выпрямленные		Размеры, *мм*	Вес, *кг*
	последовательно	параллельно	всего		напряжение, *в*	ток, *а*		
Для однофазной мостовой схемы выпрямления								
ВК-103	6	3	72	50	24	1,2	263×65	2,2
ВК-117	6	2	48	50	24	0,8	185×75	1,4
ВК-120	4	2	32	32	16	0,8	185×75	1,4
ВК-126	2	6	48	16	8	2,4	185×75	1,4
ВК-132	6	1	24	56	28	0,36	155×75	1,0
ВК-133	3	2	24	28	14	0,72	155×75	1,0
Для двухфазной схемы выпрямления (с нулевым выводом трансформатора)								
ВК-128	2	6	24	6	2,2	2,4	185×75	1,4

Таблица 13

Тип выпрямителя	Назначение	Выпрямленные		Напряжение на входе, *в*	Схема соединения	Размеры, *мм*
		напряжение, *в*	ток, *а*			
ВАК-9	Питание аппаратов	25	0,6	127/220	Однофазная мостовая	180×160×110
ВАК-12	То же	2—4	1—1,5	110	То же	175×210×230
ВКГ-100м	Питание гальванических ванн	9—12	600	220/380	Трехфазная мостовая	600×750×1 100
ВКГ-101м	То же	6	600	220/380	То же	600×750×110
ВКАП-1	Зарядка аккумуляторов	42	70	110/220	» »	500×700×1 300
ВАК-13	То же	13,2	0,4—2,4	110/220	Однофазная мостовая	175×210×310
ВАК-51	» »	6—12	13—5	110/220	Однофазная со средней точкой	360×160×210
ВАК-05	Источник постоянного тока	4±0,6	0,5	127/220	Однофазная мостовая	45×85×92

Примечание. Регулирование напряжения производится плавно при помощи магнитного шунта в силовом трансформаторе и скачкообразно при переключении вторичной обмотки трансформатора.

Данные некоторых меднозакисных вентилей с дисковыми диодами приведены в табл. 12.

Данные некоторых выпрямительных устройств с меднозакисными вентилями приведены в табл. 13.

Меднозакисные вентили, используемые в измерительных приборах, могут быть также применены в отдельных маломощных выпрямителях. Данные этих вентилей приведены в табл. 14.

Таблица 14

Тип столбика	Число последовательно соединенных диодов	Выпрямленные		Напряжение на входе, *в*	Размеры, *мм*	Вес, *г*
		напряжение, *в*	ток, *ма*			
Для однотактной однофазной схемы выпрямления						
ВК-02-01	1	1,0	1,4	4	6×25	2,3
ВК-02-2	1	1,2	1,6	4	6×36	2,6
ВК-20-19	5	4,5	6	20	26×22	24,0
ВК-22-24	10	9,0	11,5	40	36×22	65,0
Для однофазной мостовой схемы выпрямления						
ВК-07-01	1	2,5	3,4	4	26×50	18,5
ВК-07-02	1	3,8	5,0	8	26×50	18,5
ВК-07-7	3	6,5	8,8	12	30×22	18,5
ВК-20-1	1	2,5	2,5	4	32×22	35,0
ВК-20-2	2	4,5	6,2	8	37×22	48,0
ВК-20-5	5	12,5	17,0	20	52×22	88,0
ВК-20-6	6	13,5	17,0	24	57×22	103,0
Для двухфазной схемы выпрямления (с нулевым выводом трансформатора)						
ВК-20-7	1	2,0	2,5	4	28×22	27,0
ВК-20-8	2	4,5	6,2	8	31×22	33,0
ВК-20-11	5	12,5	17,0	20	40×22	54,0
ВК-20-12	6	13,5	17,0	24	43×22	61,0

Данные, приведенные в табл. 12 и 14, соответствуют работе выпрямительных схем на активную нагрузку.

5. ГЕРМАНИЕВЫЕ ДИОДЫ

В настоящее время различают два вида германиевых диодов: точечные и плоскостные.

В точечном германиевом диоде выпрямление осуществляется в запорном слое, образующемся у места кон-

такта кристалла германия[1] с металлической иглой, как это описывалось выше.

Современные германиевые точечные диоды имеют сварной контакт между металлическим острием и кристаллом. Сварка острия с кристаллом осуществляется пропусканием тока в прямом направлении в течение 5—10 *сек.* При сварке ток превышает нормальное его значение в 3—5 раз. При этом происходит разогревание места контакта и острие контактной пружины проникает в глубь кристалла, образуя полусферический контакт диаметром около 0,005 *мм.* Характеристики и параметры диода при сварке контакта изменяются незначительно.

Отечественной промышленностью выпускаются германиевые диоды с точечными контактами типа ДГ-Ц. Их внешний вид, схематическое устройство и вольтамперная характеристика приведены на рис. 17. Все диоды типа ДГ-Ц конструктивно одинаково оформлены и изготовляются по единой технологии. Кроме диодов типа ДГ-Ц, изготовляют почти такие же германиевые диоды типа Д2 в стеклянном корпусе.

Германиевые точечные диоды применяются главным образом в радиотехнических устройствах, например для детектирования, а также могут быть использованы для выпрямления тока промышленной частоты в маломощных устройствах.

Данные промышленных типов точечных диодов приведены в табл. 15.

Емкость между электродами (проходная) во всех типах точечных диодов ДГ-Ц меньше 1 *пф.* Вес диода не превышает 1,7 *г.* Срок службы (гарантийный) 4 000 *ч.*

Диоды имеют выводы из мягкой проволоки. Припайку вывода следует производить на расстоянии не менее 10 *мм* от патрона диода, так как в случае перегрева вывода и

---

[1] Германий представляет собой твердый серебристо-серый металл, отличающийся большой хрупкостью. Его существование было впервые предсказано Д. И. Менделеевым в 1871 г., но он был открыт только в 1886 г. Германий относится к IV группе периодической системы элементов, т. е. в атоме германия имеются четыре валентных электрона на внешней орбите. Порядковый номер германия 32; атомный вес 72,6, удельный вес 5,4; плавится он при температуре 927—968° С.

В природе германий встречается в распыленном состоянии во многих минералах. При переработке цинковых руд в виде побочного продукта получают двуокись германия (GeO_2). Германий получают восстановлением двуокиси германия водородом.

Таблица 15

Обозначение диода	Электрические данные при температуре 20±5° С				Предельно допустимые эксплуатационные данные при температуре 20±5° С		
	Выпрямленный ток не более, *ма*	Прямой ток при +1 *в* не менее, *ма*	Обратный ток		Амплитуда обратного напряжения, *в*	Амплитуда выпрямленного тока, *ма*	Амплитуда тока при переходных процессах (в течение 1 *сек*), *ма*
			при напряжении, *в*	не более, *ма*			
ДГ-Ц1	16	2,5	—50	1,0	50	100	300
ДГ-Ц2	16	4,0	—50	0,5	50	100	300
ДГ-Ц4	16	2,5	—75	0,8	75	100	300
ДГ-Ц5	16	1,0	—75	0,25	75	100	300
ДГ-Ц6	16	2,5	—100	0,8	100	100	300
ДГ-Ц7	16	1,0	—100	0,25	100	100	300
ДГ-Ц8	25	10	—30	0,5	30	150	500
ДГ-Ц12	16	5	—10	0,5	30	50	100
ДГ-Ц13	16	1	—10	0,25	30	50	150

Рис. 17. Германиевый диод ДГ-Ц.

а — внешний вид; *б* — схематическое устройство; *в* — вольтамперная характеристика,

1 — керамическая втулка; *2* и *3* — металлические фланцы; *4* — игла из вольфрамовой проволоки; *5* — кристаллодержатель; *6* — кристалл германия; *7* — проволочные выводы.

диода может отпаяться германиевый кристалл. Рекомендуется пайку производить паяльником небольшой мощности и не очень долго нагревать место спая. Для пайки следует применять оловянно-свинцовый припой ПОС-40.

Диоды типа ДГ-Ц, как и другие полупроводниковые диоды, весьма чувствительны к изменению температуры окружающей среды. При понижении температуры до —50° С прямой ток диода может упасть до 70% значения тока, измеренного при +20° С; при этом обратный ток падает менее заметно. При повышении температуры до +70° С обратный ток увеличивается в 3 раза; повышение прямого тока с температурой менее заметно.

Одним из существенных недостатков германиевых диодов является большая их чувствительность к влаге. Попадание влаги во внутреннюю полость диода приводит к резкому ухудшению его параметров и порче.

Диоды ДГ-Ц нового выпуска имеют хорошую герметизацию и допускают эксплуатацию при относительной влажности воздуха до 98%.

Благодаря малой проходной емкости точечных диодов типа ДГ-Ц их можно включать в цепи с токами весьма высокой частоты (до 100 *Мгц*); влияние собственной емкости диода сказывается главным образом в области верхних частот.

Точечные германиевые диоды, как это видно из табл. 15, могут применяться для выпрямителей ограниченной мощности (1—2 *вт*). Это ограничение в значительной мере обусловлено малой поверхностью контакта между кристаллом и металлическим электродом. Кроме того, падение напряжения на электродах точечного диода достаточно велико и протекание по такому диоду большого тока привело бы к чрезмерному разогреванию кристалла со всеми вытекающими отсюда последствиями. Для выпрямителей мощностью более 2—3 *вт* можно использовать плоскостные германиевые диоды.

Германиевые диоды с плоскостным контактом допускают протекание выпрямленного тока до нескольких ампер при допустимых обратных напряжениях до нескольких сот вольт. При этом прямое падение напряжения на самом диоде не превышает 0,5—0,8 *в*.

Плоскостные германиевые диоды изготовляются из монокристаллов германия с проводимостью типа *n*; в одну из поверхностей кристалла искусственно вводят примеси, создающие проводимость типа *p*. В результате в кристалле германия возникают две резко разграниченные области с проводимостями типов *n* и *p*. Одним из современных способов получения *n-p* перехода в плоскостных диодах является вплавление в поверхностный слой германия небольшого количества индия[1].

---

[1] Индий—металл серебристо-белого цвета, относится к III группе периодической системы элементов, порядковый номер 49, атомный вес 114,76, удельный вес 7,3, температура плавления 156° С. Палочки металлического индия подобно оловянным при сгибании хрустят.

Индий чрезвычайно распылен и богатые им минералы неизвестны. Незначительное количество примесей индия содержится в цинковых рудах.

Индиевый электрод наносится на поверхность пластинки германия и прогревается до температуры выше температуры плавления индия. При этом атомы индия диффундируют в твердый германий, образуя контактный переход типа *n-p*. Атомы индия не должны проникать во всю толщу германиевого кристалла, ибо тогда во всем кристалле будет проводимость типа *p*. Для получения требуемого распределения индия в кристалле германия разработаны соответствующие технологические приемы. Одним из таких приемов является нанесение на поверхность германиевой пластинки тонкого слоя металла, хорошо смачиваемого расплавленным индием, например золота. Это смачивание замедляет диффузию индия в германий и позволяет точно управлять процессом изготовления диодов. После проникновения индия на заданную глубину в толщу германия и припаивания металлического электрода получается та часть диода, которая показана на рис. 5 в виде полупроводника с проводимостью типа *p*. Вторая часть кристалла, куда атомы индия не попали, с проводимостью типа *n* является вторым полупроводником, непосредственно примыкающим к первому. Необходимые примеси (мышьяк, сурьма и др.) добавляются в кристалл германия с проводимостью типа *n* для улучшения его свойств еще при его изготовлении (при выращивании монокристалла).

Таблица 16

Обозначение диода	Электрические данные при температуре 20±5° С						Предельно допустимые эксплуатационные данные	
	Выпрямленный ток, *ма*	Прямой ток		Обратный ток		Пробивное обратное напряжение, *в*		
		при напряжении, *в*	не менее, *ма*	при обратном напряжении, *в*	не более, *ма*		Наибольшая амплитуда обратного напряжения, *в*	Кратковременный ток через диод, *а*
ДГ-Ц21 . .	300	0,5	300	50	0,5	75	50	25
ДГ-Ц22 . .	300	0,5	300	100	0,5	150	100	25
ДГ-Ц23 . .	300	0,5	300	150	0,5	225	150	25
ДГ-Ц24 . .	300	0,5	300	200	0,5	300	200	25
ДГ-Ц25 . .	100	0,3	100	300	0,3	450	300	25
ДГ-Ц26 . .	100	0,3	100	350	0,3	525	350	25
ДГ-Ц27 . .	100	0,3	100	400	0,3	600	400	25

Отечественной промышленностью изготовляются герметичные плоскостные германиевые диоды типа ДГ-Ц. Схематическое устройство этих диодов показано на рис. 18. Кон-

структивно они оформлены одинаково: их длина составляет 21 *мм*, а диаметр 7 *мм*. Данные плоскостных германиевых диодов типа ДГ-Ц приведены в табл. 16.

Описываемые германиевые плоскостные диоды часто называют **силовыми**, так как их основное назначение сводится к выпрямлению переменного тока.

Климатические условия, при которых испытываются плоскостные диоды, влияют на их параметры. Данные табл. 16 соответствуют температуре окружающей среды 20±5° С.

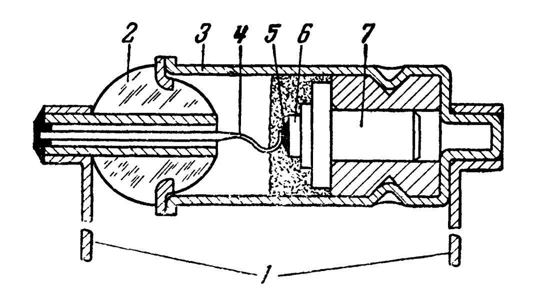


Рис. 18. Схематическое устройство плоскостных германиево-индиевых диодов.

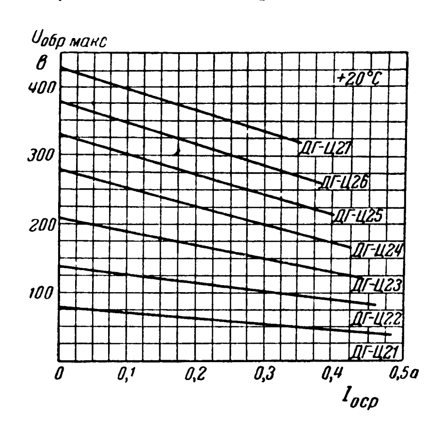
1 — контактные выводы; *2* — стеклянный изолятор; *3* — корпус; *4* — верхний токосниматель; *5* — индий; *6* — германий; *7* — нижний токосниматель.

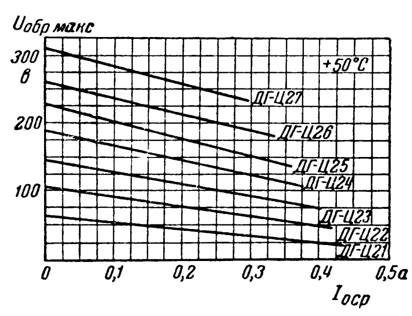
Так как емкость между электродами плоскостного диода довольно велика (до 50 *пф*), то он может быть использован в цепях тока с частотой не выше 50 *кгц*.

Важное значение при эксплуатации плоскостных диодов имеет температурный режим. Из характеристик рис. 19 видно, что при одной и той же температуре окружающей среды допустимое обратное напряжение должно быть снижено по мере увеличения тока нагрузки. Так, например, для ДГ-Ц23 при температуре +50° С и среднем значении выпрямленного тока 100 *ма* допустимое обратное напряжение составляет 125 *в*; при той же температуре и токе 300 *ма* допустимое обратное напряжение равно 90 *в*. Такая зависимость допустимого обратного напряжения от тока через диод объясняется тем, что при увеличении тока происходит разогревание кристалла и падает электрическая прочность диода.

Из приведенных на рис. 19 характеристик также видно, что при одном и том же среднем значении выпрямленного

тока допустимое обратное напряжение снижается с ростом температуры окружающей среды. Так, например, для ДГ-Ц24 при токе 200 *ма* допустимое обратное напряжение составляет 225 *в* при +20° С, 145 *в* при +50° С и 45 *в* при +70° С. Использование диодов при температурах выше +70° С может привести к их порче и не допускается.





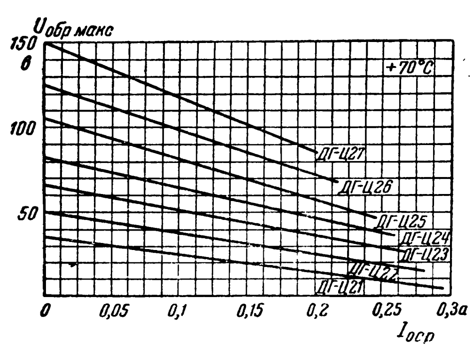


Рис. 19. Предельные режимы работы диодов ДГ-Ц при температурах + 20, + 50 и + 70° С.

Ряд опытов показал, что улучшение условий охлаждения плоскостных диодов дает возможность резко увеличить ток через них без снижения обратного напряжения. Так, например, в диодах, указанных в табл. 16, можно увеличить ток до 1—1,5 *а*, применив дополнительный радиатор.

В условиях низких температур (примерно до —60° С) диоды работают в номинальных режимах. При этом замечается некоторое уменьшение прямого тока.

Гарантированный срок службы плоскостных германиевых диодов составляет 2 000 *ч*. Практически при соблюдении

нормальных условий эксплуатации их можно использовать значительно дольше.

Плоскостные германиевые диоды не рекомендуется включать в схему последовательно или параллельно без соответствующего подбора, так как из-за неодинаковости их вольтамперных характеристик возможно такое неравномерное перераспределение напряжений и токов в отдельных диодах, которое выведет их из строя.

6. КРЕМНИЕВЫЕ ДИОДЫ

Точечные кремниевые диоды изготовлялись и применялись значительно раньше, чем германиевые. Однако вследствие технологических трудностей, связанных с изготовлением монокристаллов кремния и несовершенством технологии их производства, эти диоды могли работать лишь при малых обратных напряжениях, что привело к вытеснению их германиевыми диодами. В настоящее время имеется большое количество разнообразных точечных кремниевых диодов, используемых в радиотехнике. Однако применять эти диоды в схемах выпрямителей нельзя из-за весьма малых допустимых токов.

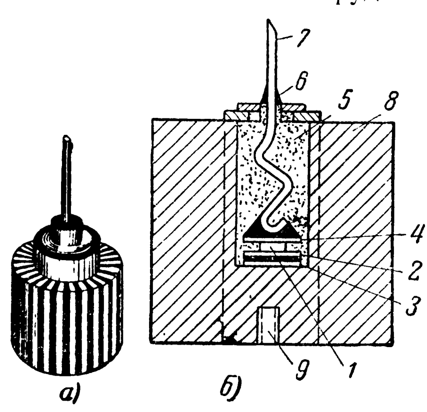


Рис. 20. Кремниевый плоскостной диод.

а — внешний вид; *б* — схематическое устройство.

1 — алюминиевая пластина; *2* — кристалл кремния; *3* — сварной контакт; *4* — анодный контакт; *5* — керамический наполнитель; *6* — стеклянный впай; *7* — вывод анода; *8* — медный радиатор; *9* — монтажное гнездо.

В связи с тем, что параметры германиевых плоскостных диодов сильно зависят от температуры окружающей среды, теперь вновь возвращаются к вопросу об использовании кремниевых диодов плоскостного типа. Решающее значение в этом вопросе имеет то обстоятельство, что кремний может быть использован при температурах до 180—200° С. Технология изготовления монокристаллов кремния значительно улучшена, однако до сих пор еще нет промышленного производства плоскостных кремниевых диодов. Пока такие диоды находятся еще в

опытной эксплуатации, а технология их изготовления окончательно не отработана.

Устройство описанного в литературе опытного плоскостного кремниево-алюминиевого диода показано на рис. 20. В этом диоде площадь контакта достигает 0,05 $см^2$. Для получения контактного перехода *п-р* кристалл кремния сплавлен с алюминиевой пластинкой. Особенностью конструкции этого диода является массивный медный радиатор для отвода тепла от кристалла. Один из электродов, соприкасающийся с алюминиевой пластинкой, выведен на радиатор, а другой—контактирующий с кремнием, выведен через стеклянный впай в верхней части радиатора. Полость, образуемая внутри радиатора, заполнена материалами, хорошо проводящими теплоту.

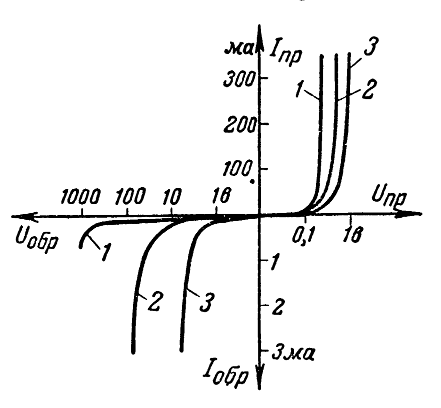


Рис. 21. Вольтамперные характеристики полупроводниковых выпрямителей.

1 — германиевый диод; *2* — селеновый диод; *3* — меднозакисный диод.

Обратный ток такого диода приблизительно в 4 раза меньше, чем у обычного германиевого диода. Прямой ток при напряжении +1 *в* составляет приблизительно 10 *а*, что соответствует плотности прямого тока 200 *а/см*^{2}. Малое падение напряжения на диоде и хороший отвод тепла от кристалла позволяют сохранять его параметры при колебаниях температуры окружающей среды в сравнительно широких пределах.

7. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ

Если ограничиться существующими промышленными образцами полупроводниковых диодов и вентилей, то следует сравнить параметры селеновых, меднозакисных и германиевых плоскостных диодов. Сравнительная оценка этих трех видов вентилей может быть сделана на основании вольтамперных характеристик, приведенных на рис. 21.

Из этих характеристик видно, что германиевые диоды обладают значительными преимуществами перед остальны-

ми типами полупроводниковых вентилей. Преимущества германиевого вентиля заключаются в бо́льших значениях прямого тока и допустимого обратного напряжения и меньших значениях обратного тока и сопротивления прямому току. Сюда следует также отнести и такие преимущества германиевого вентиля, как высокий к. п. д. и малые габариты.

Сравнительные данные существующих диодов приведены в табл. 17.

Таблица 17

Тип диода	Пробивное напряжение диода, *в*	Допустимое обратное напряжение на диод, *в*	Предельные температуры, °С	
			низкая	высокая
Меднозакисный	20—30	9—12	—25	+50
Селеновый на стальной основе	50—80	20—25	—40	+70
Селеновый на алюминиевой основе (ТВС) . .	80—100	30—36	—40	+75
Германиевый	До 600	До 400	—60	+70

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ И ИХ РАСЧЕТ

8. СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ С АКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

Классификация схем. В зависимости от схемы включения вентилей различают следующие схемы выпрямления: однотактные, двухтактные и схемы с умножением напряжения. Каждая из этих схем может питаться от сети однофазного или трехфазного тока. Кроме того, к отличительным особенностям схем выпрямления относятся:

1) частота питающего напряжения (50, 400 *гц* или др.);

2) наличие или отсутствие силового трансформатора (бестрансформаторные выпрямители);

3) вид сглаживающего фильтра и характер нагрузки;

4) режим работы выпрямителя (непрерывный или импульсный).

Выбор той или иной схемы выпрямления часто зависит от особенностей эксплуатации выпрямителя и того устройства, которое питается от него (радиоприемника, передатчика или телевизора). Во многих случаях выбор схемы

выпрямления определяется необходимостью получить наименьшие размеры выпрямителя, наибольший к. п. д., наименьшую пульсацию выпрямленного тока в сочетании с наиболее простым фильтром и рядом других подобных соображений. Как правило, в радиолюбительской практике используются однофазные выпрямители. Однако возможно также и применение трехфазных выпрямителей. Чаще всего применяются сглаживающие фильтры, начинающиеся с конденсатора, что определяет емкостный характер нагрузки выпрямителя. Тем не менее весьма часто приходится использовать выпрямители с нагрузкой активного или индуктивного характера.

При расчете выпрямительных схем часто удобно считать их идеальными, т. е. пренебрегать потерями во всех элементах схемы (в трансформаторе, вентиле и фильтре), а затем учитывать потери в каждом конкретном случае. Такой порядок применяется при расчете схем с активной и индуктивной нагрузками. При расчете схем выпрямителей с емкостной нагрузкой обычно используют соотношения, не требующие идеализации выпрямителя и учитывающие реальные потери в трансформаторе, вентиле и фильтре.

Однотактные схемы выпрямления. Однофазная однотактная схема выпрямления с активной нагрузкой показана на рис. 22,*а*. Такую схему выпрямления часто называют однофазной однополупериодной. Этим подчеркивается, что ток проходит через вентиль и нагрузку только в течение одной половины периода, когда анод вентиля (или соответствующий ему электрод) находится под положительным потенциалом относительно катода (второго электрода вентиля). Направление тока через вентиль показано стрелкой. Таким образом, по сопротивлению нагрузки и вентилю протекает пульсирующий ток, форма которого соответствует кривой на рис. 22,*в*, если на входе трансформатора или на его вторичной обмотке имеется синусоидальное напряжение (рис. 22,*б*).

При активной нагрузке $R_н$, т. е. когда отсутствует сдвиг по фазе между током и напряжением на нагрузке [1], формы кривых тока и напряжения во вторичной обмотке трансформатора и на нагрузке будут одинаковы. Активной нагрузкой для выпрямителя являются, например, накальные цепи приемно-усилительных и генераторных ламп, анодные цепи

[1] При сдвиге фаз ток и напряжение проходят через свои нулевые и максимальные значения неодновременно.

электронных ламп и другие подобные цепи, питаемые от выпрямителя без сглаживающего фильтра.

Ток в первичной обмотке трансформатора изменяется не по синусоидальному закону, так как постоянная составляющая выпрямленного тока не трансформируется в первичную обмотку трансформатора. Форма тока в первичной обмотке показана на рис. 22,*г*. При этом не учтен ток холостого хода

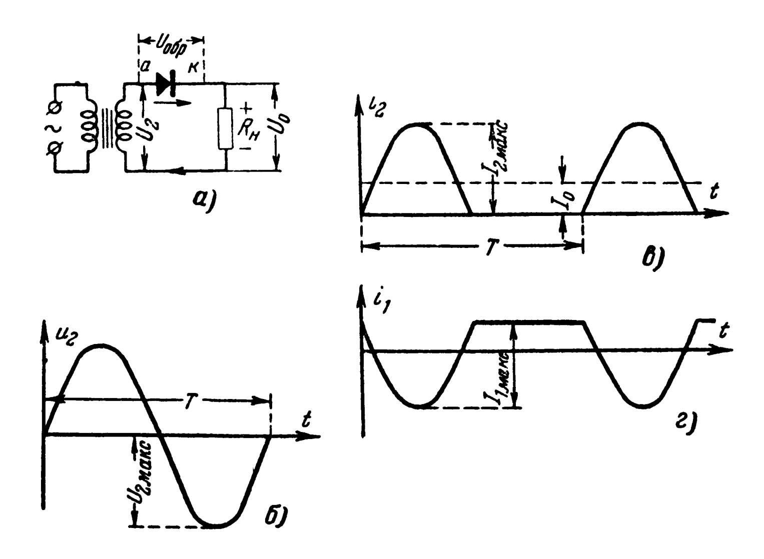


Рис. 22. Однофазная однотактная схема выпрямления с активной нагрузкой (*а*) и графики напряжения (*б*) и токов (*в* и *г*).

трансформатора, т. е. ток в первичной обмотке трансформатора при выключенной нагрузке $R_н$.

По работе однофазной однотактной схемы можно сделать следующие выводы:

а) Постоянная составляющая выпрямленного напряжения U_0 значительно меньше действующего напряжения на вторичной обмотке трансформатора ($U_0 = 0{,}45\ U_2$).

б) Постоянная составляющая выпрямленного тока I_0 значительно меньше действующего значения тока вторичной обмотки трансформатора $\left(I_0 = \frac{U_0}{R_н} = \frac{2}{\pi} I_2\right)$, что приводит к недостаточному хорошему использованию обмоток трансформатора (см. табл. 18).

в) Большая пульсация выпрямленного тока делает эту схему мало пригодной для использования без сглаживающего фильтра.

Схема однофазного однотактного выпрямителя с индуктивной нагрузкой показана на рис. 23, *а*. Нагрузка показана в виде последовательно соединенных активного сопротивления $R_н$ и индуктивности L, так как индуктивность создается обмоткой, имеющей всегда активное сопротивление. Примером нагрузки индуктивного характера для выпрямителя может служить электромагнитное

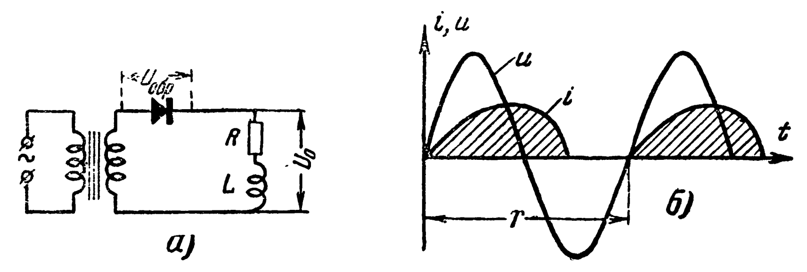


Рис. 23. Схема однофазного однотактного выпрямителя с нагрузкой индуктивного характера (*а*) и график напряжения и тока (*б*).

реле. Сопротивление обмотки реле постоянному току определит величину сопротивления $R_н$, а сопротивление этой обмотки переменному току — индуктивное сопротивление ωL.

Как видно из рис. 23,*б*, время протекания тока через вентиль и нагрузку оказывается несколько бо́льшим половины периода выпрямляемого тока. При этом также несколько меняется соотношение между средним значением выпрямленного тока и действующим значением тока вторичной обмотки трансформатора. Время протекания тока и соотношение токов зависят от соотношения величин $R_н$ и ωL. В большинстве практических случаев можно считать, что расчетные соотношения для схемы рис. 23 такие же, как и для схемы рис. 22.

Трехфазная однотактная схема с активной нагрузкой показана на рис. 24, *а*. Здесь использован трехфазный трансформатор *Тр*, у которого первичные и вторичные обмотки соединены по схеме звезда — звезда. В каждую фазу вторичной обмотки трансформатора включен вентиль (B_1, B_2 и B_3). В тот момент времени, когда напря-

жение на одной фазе имеет наибольшее положительное значение по сравнению с двумя другими, ток протекает через эту фазу, вентиль и нагрузку. Так как наибольшие положительные напряжения на фазах вторичной обмотки сдвинуты между собой на одну треть периода T_c, то форма выпрямленного тока, протекающего через сопротивление нагрузки, имеет форму кривой, показанной на рис. 24, *б*. Здесь ток и напряжение на нагрузке получаются пульсирующими, меняющимися от $U_{0\,мин}$ до $U_{0\,макс}$ с частотой, в 3 раза большей, чем частота сети ($T_c = 3T_п$).

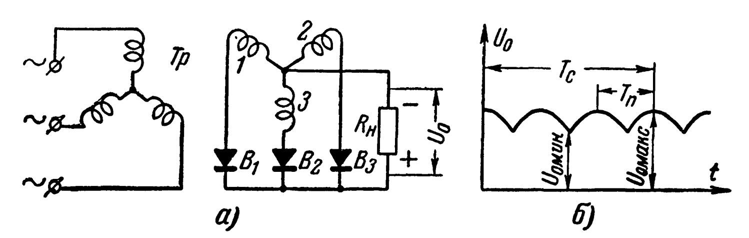


Рис. 24. Трехфазная однотактная схема выпрямления (*а*) и график выпрямленного напряжения (*б*).

Достоинством трехфазной схемы выпрямления, как это видно из графика рис. 24,*б*, является небольшая пульсация выпрямленного напряжения. Коэффициент пульсации в этой схеме значительно меньше, чем в однофазной схеме. К достоинствам этой схемы также относится то, что пульсация выпрямленного напряжения происходит с утроенной частотой сети, что значительно облегчает создание сглаживающего фильтра. Кроме того, схема обеспечивает равномерную нагрузку фаз, что важно при потреблении достаточно большой мощности из сети.

Схема, подобная описанной, применяется для выпрямления больших токов при помощи селеновых вентилей. При этом вентили $В_1$, $В_2$ и $В_3$ объединяются обычно в один выпрямительный столбик, как это указывалось выше.

Двухтактные схемы выпрямления. Существуют две однофазные двухтактные схемы выпрямления: со средней точкой вторичной обмотки трансформатора (рис. 25,*а*) и мостовая схема (рис. 25,*б*).

В двухтактных схемах происходит выпрямление обеих полуволн напряжения переменного тока. Этим объясняется, что часто такие схемы называют двухполупериодными.

В схеме рис. 25,*а* вентили B_1 и B_2 действуют поочередно через каждые полпериода. Ток протекает по тому из вентилей, у которого анод положителен по отношению к катоду. В то время когда анод одного вентиля имеет положительный потенциал, анод второго вентиля имеет отрицательный по-

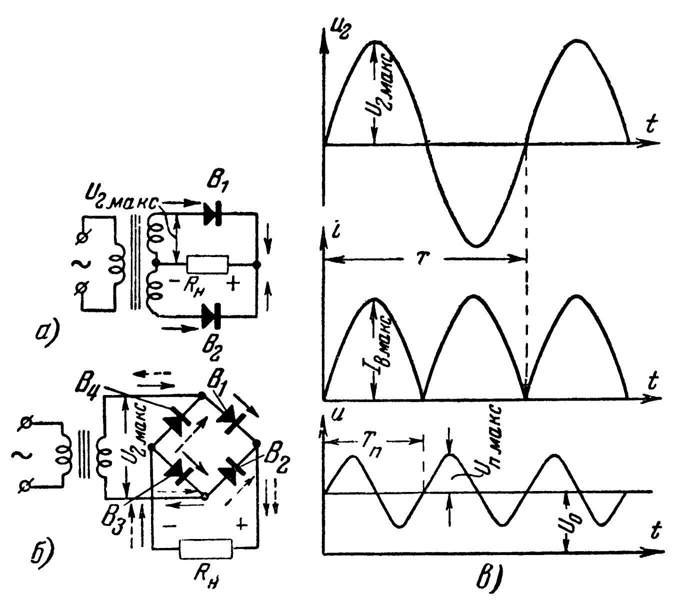


Рис. 25. Однофазные двухтактные схемы выпрямления.

а — со средней точкой; *б* — мостовая; *в* — график тока и напряжения.

тенциал и тока не проводит. В результате совместного действия обоих вентилей через сопротивление нагрузки протекает ток одного направления, как это показано на графике выпрямленного тока (рис. 25,*в*). Пульсация выпрямленного тока и напряжения получается меньшей, чем в однофазной однотактной схеме выпрямления. При этом частота пульсации равна удвоенной частоте сети.

В схеме рис. 25,*б* ток протекает в течение одного полупериода через последовательно соединенные вентиль B_1, сопротивление нагрузки $R_н$ и вентиль B_3, а во второй полупериод — через вентиль B_2, сопротивление нагрузки и вентиль B_4. Направление тока в первый полупериод показано на рис. 25,*б* сплошной стрелкой, а во второй полупериод — пунктирной. Характер изменения тока в нагрузке и пульсации такие же, как для схемы со средней точкой (рис. 25,*в*).

Так как в двухтактных схемах выпрямления обмотки трансформатора используются лучше, чем в однотактной однофазной схеме, то это дает возможность уменьшить размеры трансформаторов.

При выпрямлении больших мощностей предпочтительнее использовать схему рис. 25,*б*, так как для этой схемы размеры трансформатора будут меньше, а конструкция — проще.

Наряду с рассмотренными схемами однофазного двухтактного выпрямления представляет интерес трехфазная двухтактная схема выпрямления, так называемая схема трехфазного моста (рис. 26, *а*). Здесь, как и в однотакт-

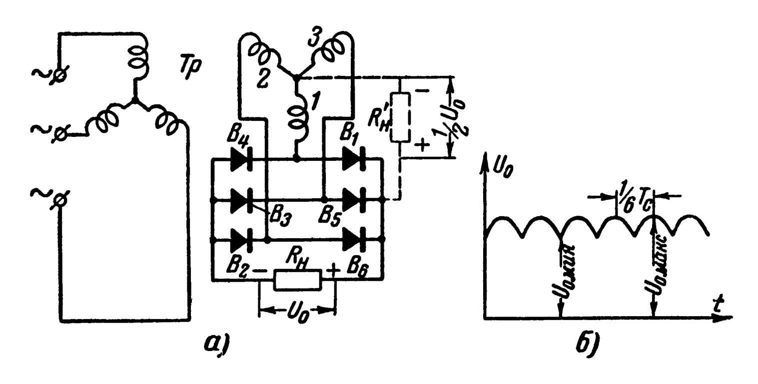


Рис. 26. Схема трехфазного моста (*а*) и график напряжения (*б*).

ной трехфазной схеме выпрямления, происходит чередование работы фаз трансформатора. В то время когда наибольшее положительное напряжение имеется между фазами *1* — *2* (плюс на выводе фазы *1*), ток протекает через вентиль $В_1$, сопротивление нагрузки $R_н$ и вентиль $В_2$. Через одну шестую часть периода, когда наибольшее положительное напряжение будет между фазами *1* — *3*, ток потечет через вентиль $В_1$, сопротивление нагрузки и вентиль $В_3$. Так, каждую шестую часть периода будут меняться пары последовательно соединенных вентилей, а на нагрузке будет одно и то же (по полярности) напряжение U_0, меняющееся в пределах $U_{0\,мин} — U_{0\,макс}$. На схеме рис. 26, *а* пунктиром показано возможное включение второго сопротивления нагрузки $R'_н$, рассчитанного на выпрямленное напряжение $0{,}5U_0$.

Достоинствами такой схемы являются: малая пульсация выпрямленного напряжения с частотой, в 6 раз большей, чем частота сети; хорошее использование обмоток трансформатора; низкое обратное напряжение на вентилях, что позволяет применять меньшее число последовательно соединенных диодов в каждом вентиле; возможность получения достаточно высокого выпрямленного напряжения при питании схемы от сети без трансформатора. Обычно такие схемы выпрямления применяются при достаточно большой выпрямленной мощности с целью более равномерной нагрузки фаз.

Расчетные соотношения для схем, работающих на активную нагрузку. Для расчета выпрямителя задаются обычно средние значения выпрямленного тока I_0 и напряжения U_0. По ним можно определить токи и напряжения в отдельных частях схемы. Для выпрямителей без потерь (идеализированных), работающих на чисто активную нагрузку, необходимые расчетные соотношения приведены в табл. 18.

9. СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ С ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКОЙ

В маломощных выпрямителях выпрямленное напряжение сглаживается при помощи фильтров, которые обычно начинаются с емкости (П-образный фильтр). Такие фильтры создают емкостный характер нагрузки для выпрямителя. Емкостный характер нагрузки для выпрямителя представляют также аккумуляторы, заряжаемые от выпрямителя. Схемы выпрямителей с умножением напряжения также представляют собой выпрямители с емкостной нагрузкой. Рассмотрим несколько схем выпрямления с емкостной нагрузкой.

Однофазные схемы выпрямителей с емкостной нагрузкой. На рис. 27,*а* представлена схема однофазного однотактного выпрямителя с емкостным фильтром. Процесс выпрямления тока в этой схеме может быть пояснен следующим образом.

При первом включении выпрямителя, когда напряжение на зажимах конденсатора *C* равно нулю, ток через вентиль *B* будет протекать с того момента, как только на анод вентиля будет подан положительный потенциал. При этом конденсатор начнет заряжаться. Этим самым будет обусловлен большой бросок тока через вентиль. По мере заряда конденсатора будет нарастать напряжение на его зажимах и ток заряда будет уменьшаться. Когда конденсатор заря-

Таблица 18

Расчетные соотношения для выпрямителей без потерь с активной нагрузкой

Определяемая величина и ее обозначение	Схемы выпрямления				
	Однотактные		Двухтактные		
	Однофазная	Трехфазная	Со средней точкой	Однофазный мост	Трехфазный мост
Постоянная составляющая выпрямленного напряжения U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0
Действующее значение напряжения на фазе вторичной обмотки трансформатора U_2 . . .	2,22 U_0	0,855 U_0	1,11 U_0	1,11 U_0	0,74U_0 (треугольник) 0,43 U_0 (звезда)
Наибольшее (амплитудное) значение обратного напряжения, приложенное к вентилю, $U_{обр\ макс}$	3,14 U_0	2,1 U_0	3,14 U_0	1,57 U_0	1,05 U_0
Амплитуда переменной составляющей выпрямленного напряжения $U_{п\ макс}$	1,57 U_0	0,25 U_0	0,67 U_0	0,67 U_0	0,06 U_0
Частота пульсации выпрямленного напряжения $f_п$ (*гц*) при частоте сети 50 *гц*	50	150	100	100	300
Действующее значение тока через вентиль $I_в$	1,57 I_0	0,59 I_0	0,785 I_0	0,785 I_0	0,59 I_0

Определяемая величина и ее обозначение	Схемы выпрямления				
	Однотактные		Двухтактные		
	Однофазная	Трехфазная	Со средней точкой	Однофазный мост	Трехфазный мост
Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора I_2	1,57 I_0	0,59 I_0	0,785 I_0	1,11 I_0	0,48I_0 (треугольник) 0,835 I_0 (звезда)
Действующее значение тока первичной обмотки трансформатора I_1 без учета тока холостого хода	1,21 $K_{mp}I_0$	0,49 $K_{mp}I_0$	1,11 $K_{mp}I_0$	1,11 $K_{mp}I_0$	$K_{mp}I_2$
Коэффициент использования вторичной обмотки трансформатора $K_2 = \frac{U_0I_0}{U_2I_2m_2}$	0,29	0,66	0,57	0,81	0,94
Коэффициент использования первичной обмотки трансформатора $K_1 = \frac{U_0I_0}{U_1I_1m_1}$	0,37	0,8	0,81	0,81	0,94

Примечания: 1. $K_{mp} = \frac{w_2}{w_1}$ (коэффициент трансформации).

2. Соотношения токов и напряжений действительны при любой частоте питающего напр яжения.

3. m_1 — число фаз первичной обмотки трансформатора.

4. m_2 — число фаз вторичной обмотки трансформатора.

дится до максимального напряжения, равного амплитуде напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора $U_{2\,макс}$, ток через вентиль прекратится и заряд конденсатора на этом закончится. Так как напряжение на зажимах трансформатора начнет уменьшаться, то окажется, что анод вентиля станет отрицательным по отношению к катоду и вентиль не будет пропускать тока (через полупроводниковые вентили в это время возможно протекание обратного тока).

Таким образом, в нагруженном выпрямителе во время отсутствия тока через вентиль конденсатор окажется замкнутым на сопротивление нагрузки $R_н$ и будет через это сопро-

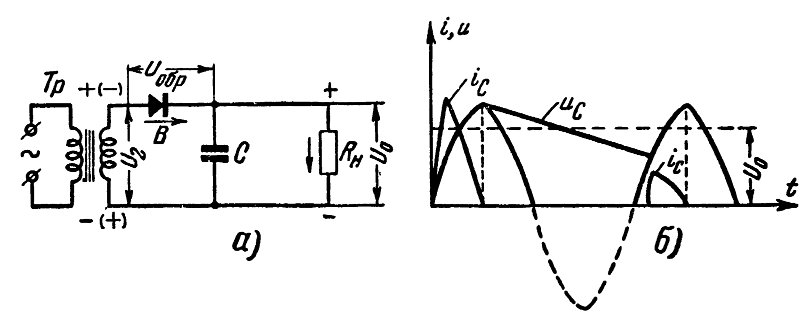


Рис. 27. Однофазная однотактная схема выпрямления с емкостной нагрузкой (*а*) и график токов и напряжений (*б*).

тивление разряжаться. По мере разряда конденсатора будет падать напряжение на его зажимах.

Если емкость конденсатора и сопротивление нагрузки малы (ток нагрузки велик), то конденсатор разрядится быстро и ток в нагрузке прекратится прежде, чем описанный процесс начнет повторяться. Если же емкость конденсатора достаточно велика, а ток нагрузки мал, то разряд конденсатора будет происходить медленно и к началу последующего положительного полупериода выпрямляемого тока на конденсаторе будет еще достаточно большое напряжение. В этот момент времени катод вентиля будет оставаться более положительным, чем анод, и тока через вентиль не будет. Вентиль начнет пропускать ток только после того, как напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора станет больше напряжения на конденсаторе. Таким образом, время протекания тока через вентиль будет намного меньше 0,5 *T*. В таких схемах происходит то, что принято называть отсечкой тока. Обычно величины емкости

и сопротивления нагрузки выбираются такими, что время протекания тока равно примерно 0,1—0,2 T.

Описанный процесс в схеме рис. 27,*а* будет периодически повторяться и может быть иллюстрирован графиком, приведенным на рис. 27,*б*. Из этого графика видно, что действие емкости C приводит к повышению постоянной составляющей выпрямленного напряжения U_0 и уменьшению пульсации этого напряжения, причем это действие проявляется тем сильнее, чем больше емкость конденсатора и чем меньше ток нагрузки. Частота пульсации выпрямленного напряжения равна частоте сети.

При отсутствии сопротивления нагрузки ($R_н = \infty$) заряженный конденсатор не будет разряжаться и максимальное напряжение на нем будет $U_{C\,макс} = U_{0\,х.\,х} = 1{,}41\,U_2 = U_{2\,макс}$. При этом обратное напряжение на вентиле в момент отсутствия тока через него будет максимальным и равным сумме напряжений на конденсаторе и зажимах вторичной обмотки трансформатора, т. е. $U_{обр\,макс} = U_{2\,макс} + U_{C\,макс} = 2U_{2\,макс}$. Суммирование напряжений трансформатора и конденсатора при отрицательной полуволне напряжения выпрямленного тока непосредственно вытекает из полярностей напряжений, показанных на схеме рис. 27,*а*. Большое обратное напряжение является одним из недостатков, свойственных данной схеме выпрямления.

Не менее существенным недостатком рассматриваемой схемы является также и то, что действующее значение тока I_2 в 2,5—3 раза больше тока нагрузки I_0.

Если выпрямитель используется для зарядки аккумуляторов, то процессы в нем происходят аналогично описанным. В этом случае роль конденсатора выполняют аккумуляторы, напряжение на которых растет по мере их зарядки. Ток через вентиль определяется соотношением напряжений вторичной обмотки трансформатора и аккумуляторов. Если надо поддерживать постоянным ток зарядки, то должно быть предусмотрено устройство для регулирования напряжения трансформатора.

На рис. 28 показана однофазная двухтактная схема выпрямителя с емкостной нагрузкой, в которой ранее описанные процессы повторяются с удвоенной частотой. Каждый вентиль поочередно запирается и отпирается. При каждом отпирании одного из вентилей происходит заряд конденсаторов, а при отсутствии тока — разряд через сопротивление

нагрузки. Как и в случае выпрямления по схеме рис. 25,*а*, пульсация выпрямленного напряжения происходит с удвоенной частотой по сравнению с частотой сети. Все сказанное относительно повышения постоянной составляющей и уменьшения пульсации выпрямленного напряжения в схеме рис. 27,*а* остается в силе и для схемы рис. 28.

Принципиально могут быть использованы и многофазные схемы с емкостной нагрузкой. Практически же такие схемы выпрямителей почти не применяются.

Схемы выпрямления с умножением напряжения. Для повышения выпрямленного напряжения при заданном напряжении на вторичной обмотке трансформатора (или в сети

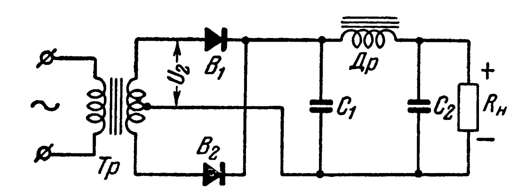


Рис. 28. Однофазная двухтактная схема выпрямления с емкостной нагрузкой.

переменного тока), а также при отсутствии силового трансформатора с необходимым коэффициентом трансформации применяют схемы выпрямления с умножением напряжения. Принципиально можно получить любую кратность умножения напряжения. Практически же используют схемы выпрямления с умножением в 2, 3 и 4 раза.

Наиболее часто встречающаяся схема выпрямления с удвоением напряжения представлена на рис. 29,*а*. Эту схему можно представить как две однофазные однотактные схемы, соединенные последовательно по постоянному току. Каждая однотактная схема работает с емкостной нагрузкой и создает на одном из конденсаторов (C_1 или C_2) напряжение 0,5 U_0, а нагрузка $R_н$ присоединена параллельно конденсаторам C_1 и C_2, соединенным между собой последовательно. В течение одного полупериода ток протекает через вентиль B_1 и заряжает конденсатор C_1. Во время другого полупериода ток зарядит конденсатор C_2, пройдя через вентиль B_2. В момент отсутствия тока через вентили происходит разряд конденсаторов через нагрузку $R_н$. Все ранее сказанное о схемах выпрямления с емкостной нагрузкой действительно и для схемы рис. 29,*а*.

При $R_н = \infty$ конденсаторы заряжаются до максимального напряжения, равного амплитудному значению напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора; напряжение на зажимах последовательно соединенных конденсаторов C_1 и C_2 при этом будет:

$$U_{0\,макс} = 2U_{2\,макс} = 2\sqrt{2}U_2,$$

где U_2 — действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

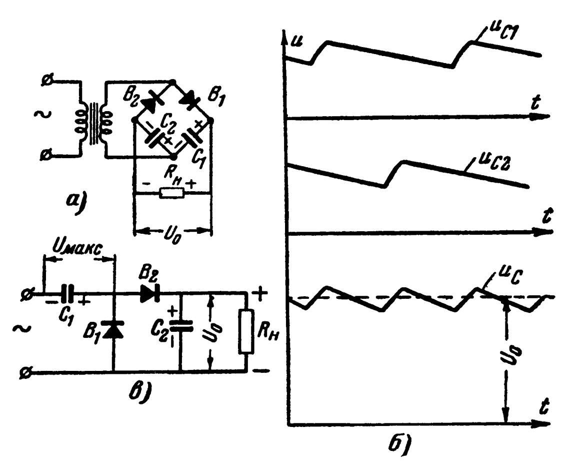


Рис. 29. Схемы удвоения напряжения.

а — двухтактная с трансформатором; *б* — график напряжений двухтактной схемы; *в* — однотактная бестрансформаторная схема.

Величина пульсации напряжения на нагрузке будет зависеть от емкости конденсаторов C_1 и C_2, а также от сопротивления нагрузки $R_н$. При большом токе нагрузки конденсаторы должны иметь большую емкость. В противном случае каждый из конденсаторов очень быстро разрядится и пульсация напряжения на нагрузке станет чрезмерной. Этим объясняется, что такие схемы выпрямления применяются главным образом при малом токе нагрузки для получения высоких выпрямленных напряжений.

Сравнивая схему удвоения напряжения (рис. 29,*а*) со схемой однофазного моста (рис. 25,*б*) можно видеть, что в той и другой схемах выпрямляются обе полуволны переменного напряжения. Отсюда следует, что частота пульсации выпрямленного напряжения в этих схемах будет

в 2 раза больше частоты сети. Это также видно из графиков рис. 29,*б*. Поэтому такие схемы называются однофазными двухтактными схемами.

В отличие от схемы рис. 29,*а* применяются также однофазные однотактные схемы выпрямления с удвоением (в общем случае — с умножением) напряжения.

Для выпрямления с удвоением напряжения может быть применена бестрансформаторная однотактная схема, показанная на рис. 29,*в*. Процесс выпрямления в этой схеме можно пояснить следующим образом.

В течение некоторой части положительного полупериода переменного напряжения конденсатор C_1 заряжается через вентиль B_1 до напряжения $U_{макс}$. Во второй полупериод, когда вентиль B_1 не проводит тока, создается цепь, включающая вентиль B_2 и конденсаторы C_1 и C_2, причем в этой цепи будут действовать последовательно соединенные напряжения сети и конденсатора C_1. В результате конденсатор C_2 зарядится до напряжения $2U_{макс}$. В процессе заряда конденсатора C_2 произойдет разряд конденсатора C_1, а вентиль B_1 отопрется. В последующий положительный полупериод переменного напряжения процесс начнет повторяться. Как и в схеме рис. 27,*а*, выпрямленное напряжение на нагрузке будет пульсировать с частотой, равной частоте сети.

На рис. 30,*а* приведена однотактная схема выпрямления с утроением напряжения. Действие схемы может быть описано следующим образом.

Когда на аноде вентиля B_1 имеется положительный потенциал относительно катода, происходит заряд конденсатора C_1 до напряжения $U_{макс}$, т. е. до амплитудного значения напряжения сети переменного тока или вторичной обмотки трансформатора (если таковой применяется). Во второй полупериод переменного напряжения, когда полярность напряжения, подводимого к схеме, изменится, создается цепь, включающая конденсаторы C_1 и C_2 и вентиль B_2, причем к конденсатору C_2 будет подведено напряжение, равное сумме напряжений сети и конденсатора C_1. В результате конденсатор C_2 окажется заряженным через вентиль B_2 до напряжения $2U_{макс}$. В последующий положительный полупериод выпрямляемого напряжения, когда возобновится заряд конденсатора C_1, вентиль B_2 будет заперт, а вентиль B_3 отопрется и даст возможность конденсатору C_3 зарядиться от конденсатора C_2 до напря-

жения $2U_{макс}$. При этом цепь заряда конденсатора C_3 включает в себя также и заряжающийся в это время через вентиль B_1 конденсатор C_1. В результате окажутся заряженными конденсаторы C_1 и C_3, которые при последовательном соединении обеспечивают на нагрузке напряжение, приблизительно равное $3U_{макс}$.

Приведенные рассуждения верны только при правильном выборе емкостей конденсаторов C_1, C_2 и C_3. Все ранее указанные соображения о пульсации выпрямленного на-

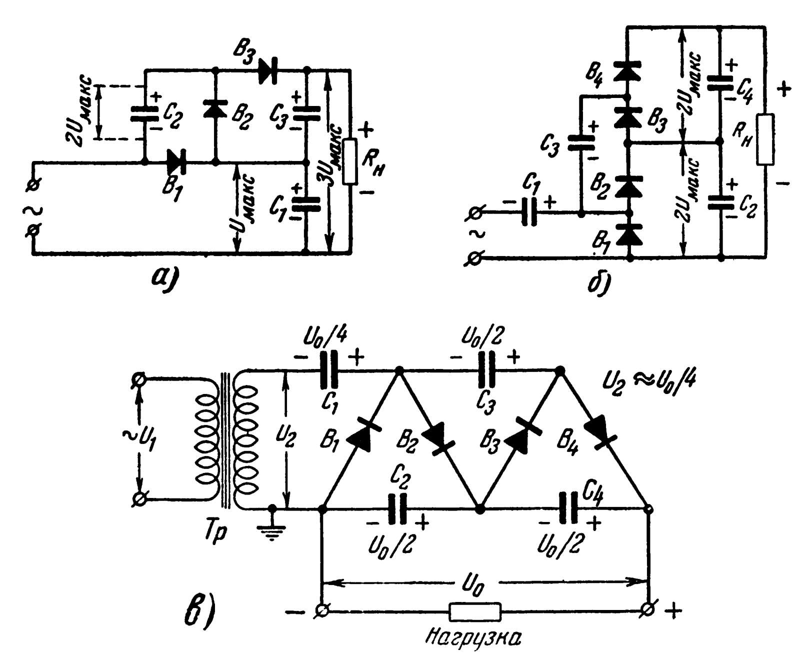


Рис. 30. Однотактные схемы выпрямления с умножением напряжения. *а* — схема утроения напряжения; *б* — схема учетверения напряжения; *в* — то же с трансформатором.

пряжения остаются верными и здесь, причем частота пульсации, как и во всех однотактных схемах, равна частоте сети.

Однотактные схемы выпрямления с умножением напряжения в 4 раза показаны на рис, 30,*б* и *в*. Легко видеть, что обе схемы совершенно одинаковы; их различие состоит только в наличии или отсутствии силового трансформатора *Тр*.

Процессы, происходящие в схеме рис. 30,*б*, аналогичны процессам в схеме рис. 30,*а*. Очевидно, что часть схемы, включающая в себя конденсаторы C_1 и C_2 и вентили B_1 и B_2, подобна схеме удвоения напряжения (рис. 29,*в*). В результате действия этой части схемы на конденсаторе C_2 появится напряжение $2U_{макс}$. Конденсатор C_2, разряжаясь через вентили B_3 и B_1 (за время, в течение которого анод вентиля B_1 находится под положительным потенциалом), зарядит конденсатор C_3 до напряжения $2U_{макс}$. При этом вентиль B_4 заперт (когда вентиль B_3 проводит ток, анод вентиля B_4 находится под отрицательным потенциалом) В следующий полупериод переменного напряжения, когда вентиль B_3 запирается, конденсатор C_3, разряжаясь через вентиль B_4 и проводящий вентиль B_2, зарядит конденсатор C_4 до напряжения $2U_{макс}$. В результате сопротивление нагрузки $R_н$, подключенное к последовательно соединенным конденсаторам C_2 и C_4, будет находиться под суммарным напряжением, приблизительно равным $4U_{макс}$.

Из приведенных описаний работы схем выпрямителей с умножением напряжения очевидно, что выпрямленное напряжение на нагрузке достигает заданного значения не сразу после включения выпрямителя в сеть переменного тока, а после некоторого числа полупериодов, число которых равно кратности умножения напряжения (в схеме утроения — после трех полупериодов, в схеме учетверения — после четырех и т. д.).

Большая кратность умножения вызывает применение большого числа вентилей и конденсаторов (число вентилей и конденсаторов равно кратности умножения). В схемах умножения вентили должны быть рассчитаны на высокие обратные напряжения, а конденсаторы — на соответствующие зарядные и разрядные токи. При этом следует иметь в виду, что в схемах, подобных описанным, нельзя применять электролитические конденсаторы.

Как правило, схемы умножения напряжения целесообразно применять с селеновыми вентилями; использовать германиевые вентили для получения высоких напряжений не рекомендуется, так как при последовательном соединении большого числа этих вентилей не обеспечивается равномерное распределение обратного напряжения на диодах.

Расчетные соотношения в схемах выпрямителей с емкостной нагрузкой. Расчет схемы с емкостной нагрузкой с уче-

том потерь в выпрямителе (не считая потерь в сглаживающем фильтре) сводится к следующему:

1. Определяется вспомогательный коэффициент

$$A = \frac{3{,}14 I_0 R_в}{m U_0},$$

где I_0 — постоянная составляющая выпрямленного тока в нагрузке, *а*;

U_0 — постоянная составляющая выпрямленного напряжения на входе сглаживающего фильтра (на зажимах первого конденсатора), *в*;

$R_в$ — полное сопротивление фазы выпрямителя, *ом*;

m — число фаз выпрямления.

Все необходимые величины определяются в дальнейшем в зависимости от вспомогательного коэффициента A.

Для определения вспомогательного коэффициента A требуется предварительно определить полное сопротивление фазы выпрямителя $R_в$ и число фаз выпрямления m. Обе эти величины зависят от схемы выпрямления, и их значения указаны в табл. 19.

Полное сопротивление фазы выпрямителя $R_в$ складывается из внутреннего сопротивления вентиля R_i и сопротивления обмоток трансформатора каждой фазы выпрямления $R_{тр}$ (табл. 19).

Сопротивление обмоток трансформатора каждой фазы $R_{тр}$ определяется следующим образом.

При отсутствии дополнительных обмоток трансформатора

$$R_{тр} = R_2 + K_{тр}^2 R_1.$$

В случае наличия дополнительных обмоток (например, для питания цепей накала электронных ламп и т. п.)

$$R'_{тр} = 0{,}5 R_{тр}\left(1 + \frac{P_2}{P_{тр}}\right),$$

где R_2 — сопротивление фазы вторичной обмотки трансформатора, *ом*;

R_1 — сопротивление первичной обмотки, *ом*;

$K_{тр}$ — коэффициент трансформации;

P_2 — мощность вторичной обмотки, питающей выпрямитель, *ва*;

Таблица 19

Формулы для расчета выпрямителя с емкостной нагрузкой

Определяемые величины и обозначение	Схемы выпрямления (однофазные)			
	однотактная	двухтактная со средней точкой	двухтактная мостовая	двухтактная с удвоением напряжения
Число фаз выпрямления m	1	2	2	1[1]
Значение коэффициента k (для $f_c = 50$ *гц*)	0,09	0,18	0,15	0,04
Действующее значение напряжения на фазе вторичной обмотки трансформатора U_2	BU_0	BU_0	BU_0	$B\frac{U_0}{2}$
Амплитудное значение обратного напряжения на вентиле $U_{обр}$	$2{,}85U_2$	$2{,}85U_2$	$1{,}42U_2$	$2{,}85U_2$
Коэффициент трансформации $K_{тр}$	$\frac{U_2}{U_1}$	$\frac{U_2}{U_1}$	$\frac{U_2}{U_1}$	$\frac{U_2}{U_1}$
Максимальный ток через вентиль $I_{макс}$	FI_0	$0{,}5FI_0$	$0{,}5FI_0$	FI_0
Ток вторичной обмотки трансформатора I_2	DI_0	$0{,}5DI_0$	$0{,}71DI_0$	$1{,}41DI_0$
Ток первичной обмотки трансформатора (с учетом тока холостого хода) I_1	$1{,}2K_{тр} \times \sqrt{I_2^2 - I_0^2}$	$1{,}7K_{тр}I_2$	$1{,}2K_{тр}I_2$	$1{,}2K_{тр}I_2$
Сопротивление фазы выпрямителя $R_в$	$R_i + R_{тр}$	$R_i + R_{тр}$	$2R_i + R_{тр}$	$R_i + R_{тр}$

[1] При расчете сглаживающего фильтра типа LC или RC значение m для этой схемы следует принимать равным 2.

$P_{тр}$ — расчетная мощность всего трансформатора (включая мощность всех дополнительных обмоток), *ва*;

Последняя формула применяется в тех случаях, когда мощность всех дополнительных обмоток превышает 50% мощности вторичной обмотки, питающей выпрямитель.

Для определения сопротивления $R_в$ требуется знать величины сопротивлений обмоток и коэффициент трансформации. Между тем эти величины до расчета трансформатора точно неизвестны. Поэтому приходится опре-

делять значения сопротивления $R_{тр}$ вначале ориентировочно, а затем уточнять полученную величину. Для этого можно воспользоваться формулой

$$R_{тр} = k \frac{U_0}{I_0 \sqrt[4]{I_0 U_0}},$$

где коэффициент k зависит от схемы выпрямления и указан в табл. 19.

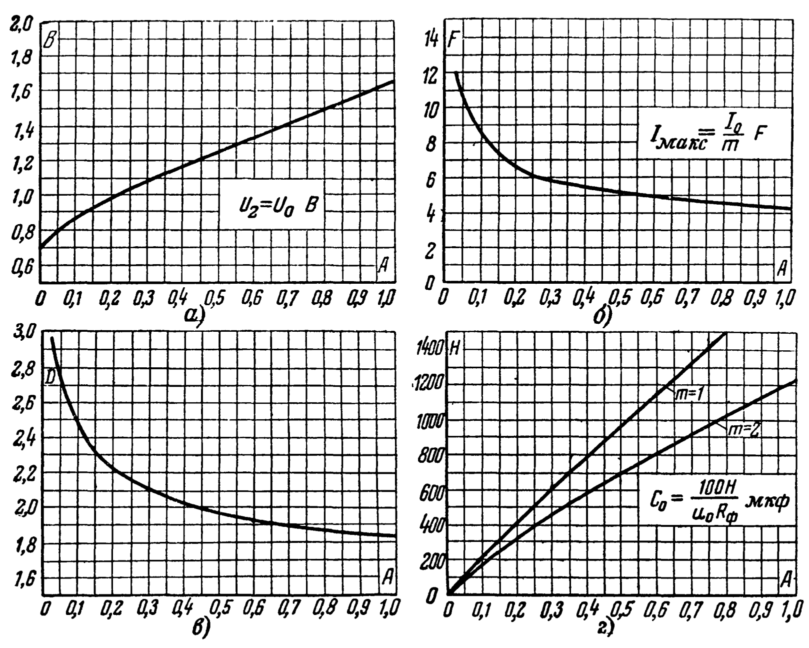


Рис. 31. Графики для определения расчетных коэффициентов B, D, F и H.

2. Определение расчетных коэффициентов, указанных в табл. 19 и зависящих от величины вспомогательного коэффициента A, производится при помощи графиков (рис. 31).

3. Пользуясь расчетными коэффициентами B, D и F и формулами табл. 19, определяют основные величины, характеризующие режим работы выпрямителя. К ним относятся следующие величины:

действующее значение напряжения на фазе вторичной обмотки трансформатора U_2;

максимальный ток через вентиль $I_{макс}$;

действующее значение тока вторичной обмотки I_2;

коэффициент трансформации $K_{тр} = \frac{U_2}{U_1}$;

действующее значение тока первичной обмотки (с учетом тока холостого хода) I_1.

При отсутствии дополнительных обмоток I_1 определяется по формулам табл. 19.

При наличии добавочных обмоток общий ток первичной обмотки рассчитывается по формуле

$$I_{1общ} = I_1 + I_3 \frac{U_3}{U_1} + I_4 \frac{U_4}{U_1} + \ldots,$$

где $I_3, I_4, \ldots$ и $U_3, U_4, \ldots$ — токи и напряжения добавочных обмоток.

Обратное напряжение на вентиле $U_{обр}$ определяется как сумма напряжений на конденсаторе и вторичной обмотке трансформатора.

Расчетные соотношения в схемах с умножением напряжения. Расчет однофазной двухтактной схемы выпрямления с удвоением напряжения (рис. 29,*а*) может быть выполнен по приведенным выше формулам. При этом в формулу для определения вспомогательного коэффициента *A* следует подставлять величину выпрямленного напряжения, приходящегося на один конденсатор, т. е. $0{,}5U_0$ и $m = 1$.

По полученным (из графиков рис. 31,*а*, *б* и *в*) значениям коэффициентов *B*, *D* и *F* и формулам табл. 19 определяются U_2, I_2 и $I_{макс}$.

Расчет схем, подобных изображенной на рис. 29,*в*, производится по следующим приближенным формулам:

1. Действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора (или напряжение сети при отсутствии трансформатора)

$$U_2 \approx \frac{0{,}85U_0}{K},$$

где *K* — кратность умножения напряжения (число каскадов умножения).

2. Амплитуда обратного напряжения на вентиле каждого каскада умножения

$$U_{обр} \approx 2{,}85U_2.$$

3. Емкость конденсатора (в микрофарадах) каждого каскада умножения должна быть не менее

$$C = \frac{I_0 \cdot 2K}{fU_0}(K + 2) \cdot 10^6,$$

где I_0 — ток нагрузки, *а*;
U_0 — выпрямленное напряжение, *в*;
f_c — частота сети, *гц*.

Напряжение на каждом конденсаторе (кроме первого) $U_{раб} = \frac{2U_0}{K}$; на первом конденсаторе напряжение будет в 2 раза меньше.

Коэффициент пульсации $K_п$ при указанной величине емкости составляет приблизительно 6%. При увеличении или уменьшении емкости пульсация выпрямленного напряжения соответственно пропорционально уменьшается или увеличивается.

10. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Схемы сглаживающих фильтров и их расчет. Как показано в табл. 1 (стр. 6), при питании радиотехнических устройств допускается весьма малая пульсация напряжения. Между тем при выпрямлении пульсация получается такой, что она превышает в десятки раз допустимую. Для уменьшения пульсации выпрямленного напряжения применяются сглаживающие фильтры. Схемы наиболее употребительных фильтров приведены на рис. 32.

Сглаживающее действие конденсатора $C_ф$ в схеме рис. 32,*а* может быть объяснено следующим образом. Переменная составляющая выпрямленного тока протекает по параллельно включенным конденсатору $C_ф$ и сопротивлению нагрузки $R_н$. Если емкость конденсатора $C_ф$ велика, то его сопротивление для переменной составляющей тока будет мало и бóльшая часть переменной составляющей тока пройдет через конденсатор, а значительно меньшая ее часть — через сопротивление нагрузки.

При этом токи будут распределяться в соответствии с соотношением

$$\frac{I_C}{I_R} = \frac{R_н}{R_C},$$

где

$$R_C = \frac{10^6}{2\pi f_c m C_ф};$$

f_c — частота сети, *гц*;
$C_ф$ — емкость конденсатора, *мкф*;
m — число фаз выпрямления.

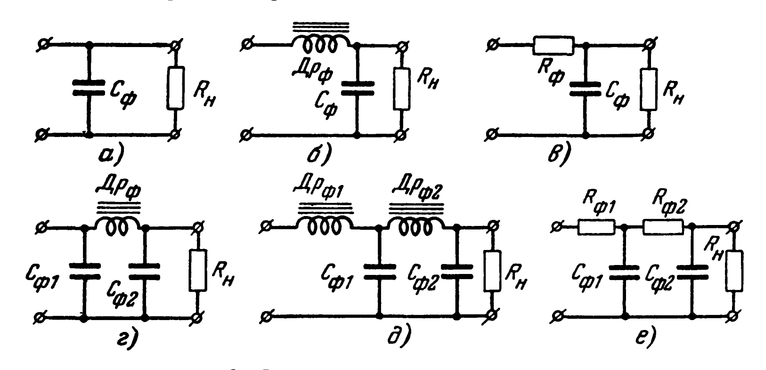


Рис. 32. Схемы сглаживающих фильтров.

а — блокирующая емкость; *б* — однозвенный Г-образный; *в* — однозвенный Г-образный с фильтрующим сопротивлением; *г* — однозвенный П-образный; *д* — двухзвенный Г-образный; *е* — двухзвенный Г-образный с фильтрующими сопротивлениями. $C_ф$, $C_{ф1}$, $C_{ф2}$ — конденсаторы; $Др_ф$, $Др_{ф1}$, $Др_{ф2}$ — дроссели; $R_ф$, $R_{ф1}$, $R_{ф2}$ — активные сопротивления; $R_н$ — сопротивление нагрузки.

Так как при изменении емкости конденсатора $C_ф$ меняются режим работы выпрямителя и коэффициент пульсации на его выходе, то конденсатор $C_ф$ обычно рассчитывается совместно с выпрямителем. Его расчет сводится к следующему:

1. Определяется вспомогательный коэффициент

$$A = \frac{3,14 I_0 R_в}{m U_0}.$$

2. Пользуясь графиком рис. 31,*г*, действительным для $f_c = 50$ *гц*, определяют расчетный коэффициент H в зависимости от A и m и находят необходимую емкость конденсатора $C_ф$ (в микрофарадах), включенного на выходе вы-

прямителя, в зависимости от заданного или выбранного значения коэффициента пульсации K_n (в процентах) по формуле

$$C_{ф} = \frac{H \cdot 100}{K_n R_в}.$$

Значение коэффициента пульсации выпрямленного напряжения на входе фильтра, начинающегося с емкости, обычно выбирают в пределах 5—15%.

Для двухтактной схемы удвоения напряжения (рис. 29,*а*) приведенная формула дает необходимую величину емкости каждого плеча. Коэффициент *H* для этой схемы следует определять по графику рис. 31,*г* для $m = 1$.

При изменении емкости конденсатора $C_ф$ будет изменяться и коэффициент пульсации напряжения (с увеличением емкости пульсация уменьшается).

Сглаживающий фильтр, показанный на рис. 32,*б*, называется Г-образным *LC*-фильтром. Действие этого фильтра сводится к следующему. Переменная составляющая выпрямленного тока должна преодолеть индуктивное сопротивление дросселя, включенное последовательно с сопротивлением нагрузки. Этим самым вызывается уменьшение амплитуды переменной составляющей тока. Далее, переменная составляющая тока замыкается в основном через конденсатор фильтра, так как сопротивление конденсатора значительно меньше сопротивления нагрузки. В результате такой фильтр оказывает сглаживающее действие, причем коэффициент сглаживания определяется соотношением

$$K_c = m^2 \omega_c^2 L C_ф = \frac{K_{n1}}{K_n},$$

где $\omega_c = 2\pi f_c$, а f_c — частота сети, *гц*;
m — число фаз выпрямления;
L — индуктивность дросселя $Др_ф$, *гн*;
$C_ф$ — емкость конденсатора, *ф*;
K_{n1} — коэффициент пульсации напряжения на входе фильтра;
K_n — коэффициент пульсации напряжения на выходе фильтра (на нагрузке):

При частоте сети $f_c = 50$ *гц* и $C_ф$ в микрофарадах можно пользоваться расчетной формулой в следующем виде:

$$LC_ф = \frac{10 K_c}{m^2}.$$

Произвольно выбирать величину индуктивности и емкости нельзя. Может оказаться, что фильтр будет не ослаблять, а усиливать имеющуюся пульсацию напряжения, если частота пульсации и собственная частота фильтра окажутся приблизительно одинаковыми. Во избежание таких резонансных явлений в фильтре необходимо выбрать его элементы так, чтобы

$$2\omega_0 \leqslant m\omega_c,$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_ф}}$ — собственная частота фильтра.

В применении к частоте сети $f_c = 50$ *гц* можно приближенно считать, что емкость фильтра (в микрофарадах) должна быть

$$C_ф \geqslant \frac{40}{m^2 L}.$$

Особенностью *LC*-фильтра является сравнительно малое падение постоянного напряжения:

$$\Delta U_ф = I_0 R_{др},$$

где $R_{др}$ — активное сопротивление обмотки дросселя сглаживающего фильтра.

Это дает возможность применять такие фильтры в устройствах с относительно большим током нагрузки. Существенным недостатком таких фильтров являются большой вес дросселя и возникающие при его работе магнитные поля рассеяния, создающие помехи работе высокочувствительным приемным устройствам. Эти недостатки устраняются в простейшем случае в Г-образном *RC*-фильтре, показанном на рис. 32,*в*. Здесь вместо дросселя, оказывающего сопротивление переменной составляющей выпрямленного тока, включено сопротивление $R_ф$.

Коэффициент сглаживания *RC*-фильтра можно определить из соотношения

$$K_c = m\omega_c R_ф C_ф,$$

где $C_ф$ — емкость конденсатора, *ф*.

Чаще приходится определять величину произведения $R_ф C_ф$ по заданному коэффициенту сглаживания.

При частоте сети $f_c = 50$ *гц* и емкости $C_ф$ в микрофарадах

$$R_ф C_ф = \frac{3\,000 K_c}{m}.$$

Существенным недостатком *RC*-фильтра является то, что одновременно с фильтрацией происходит заметное уменьшение постоянной составляющей напряжения на выходе фильтра. Падение напряжения на сопротивлении $R_ф$ будет:

$$\Delta U_ф = I_0 R_ф.$$

Этим объясняется, что *RC*-фильтры пригодны только в том случае, если ток нагрузки мал.

Приведенный на рис. 32,*г* П-образный фильтр представляет собой сочетание выходной емкости выпрямителя и Г-образного фильтра. Сглаживающее действие двухзвенных Г-образных *LC*- (рис. 32,*д*) и *RC* (рис. 32,*е*)-фильтров равно приблизительно произведению сглаживающих действий каждого из них:

$$K_c = K_{c1} K_{c2}.$$

При выборе элементов двухзвенных сглаживающих фильтров следует исходить из примерно одинаковых коэффициентов сглаживания каждого звена фильтра. Отсюда же следует, что лучше всего выбирать одинаковые емкости и индуктивности. То же самое можно сказать о двухзвенных *RC*-фильтрах. Как правило, не рекомендуется применять фильтры, состоящие более чем из двух звеньев.

Кроме сглаживающих фильтров, показанных на рис. 32, возможно также применение резонансных сглаживающих фильтров, простейшим из которых является так называемый фильтр-пробка. В таком фильтре параллельно дросселю включается небольшая емкость. Дроссель фильтра с параллельно включенной емкостью образует контур с очень большим сопротивлением для резонансной частоты этого контура, которая выбирается равной частоте пульсации.

Пример расчета П-образного сглаживающего фильтра. Пусть задано рассчитать П-образный фильтр к выпрямителю по схеме рис. 28 с напряжением на нагрузке $U_0 = 400$ *в* и током нагрузки $I_0 = 200$ *ма*.

На основании расчета выпрямителя получены (в данном случае заданы) следующие величины:

полное сопротивление фазы выпрямителя $R_в = 300$ *ом*;

падение напряжения на дросселе фильтра (определяется по графику рис. 33) составляет для данной мощности выпрямителя (80 *вт*) около 8%, или $\Delta U_ф = \frac{8 \cdot 400}{100} = 32$ *в*.

Расчет фильтра производится в следующем порядке:

1. Определяем вспомогательный коэффициент

$$A = \frac{3,14 I_0 R_в}{m U_0'} = \frac{3,14 \cdot 0,2 \cdot 300}{2(400 + 32)} = 0,218.$$

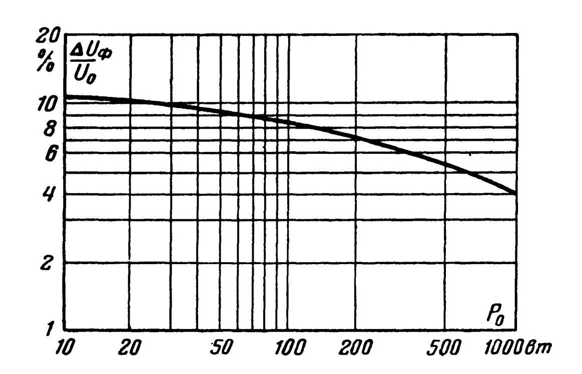


Рис. 33. График для определения относительного падения напряжения в *LC*-фильтре в зависимости от мощности выпрямленного тока.

2. Пользуясь графиком рис. 31,*г*, находим по кривой для $m = 2$ значение $H = 375$.

3. Выберем емкость первого конденсатора фильтра $C_{ф1} = 10$ *мкф* и определим коэффициент пульсации на входе фильтра:

$$K_{п1} = \frac{H \cdot 100}{C_{ф1} R_в} = \frac{375 \cdot 100}{10 \cdot 300} = 12,5\%.$$

4. Согласно назначению выпрямителя по данным табл. 1 (стр. 6) выбираем коэффициент пульсации напряжения на нагрузке $K_п = 0,1\%$ и определяем необходимый коэффициент сглаживания Г-образной части фильтра:

$$K_c = \frac{K_{п1}}{K_п} = \frac{12,5}{0,1} = 125.$$

5. Определяем произведение $LC_{ф2}$ по рассчитанному коэффициенту сглаживания в виде:

$$LC_{ф2} = \frac{10K_c}{m^2} = \frac{10 \cdot 125}{4} = 312{,}5 \textit{ гн} \cdot \textit{мкф}.$$

6. Для удобства выбираем $C_{ф1} = C_{ф2} = 10$ *мкф* и определяем индуктивность дросселя:

$$L = \frac{312{,}5}{10} = 32{,}5 \textit{ гн}.$$

Конденсаторы фильтра должны быть рассчитаны на рабочее напряжение больше $1{,}5U_0$. Выбираем рабочее напряжение конденсаторов $U_{раб} = 600$ *в*.

7. Сопротивление обмотки дросселя постоянному току определяем из соотношения

$$R_{др} = \frac{\Delta U_ф}{I_0} = \frac{32}{0{,}2} = 160 \textit{ ом}.$$

8. Проверяем неравенство $2\omega_0 \ll m\omega_c$.

Для рассчитываемого фильтра имеем:

$$2\omega_0 = \frac{2}{\sqrt{LC_{ф2}}} = \frac{2}{\sqrt{32{,}5 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}} = 111;$$

$$m\omega_c = 2 \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 628;$$

следовательно, заданное неравенство выдерживается ($111 \ll 628$).

Пример расчета RC-фильтра. Пусть задано рассчитать однозвенный RC-фильтр, через который должны питаться первые каскады радиоприемника, если известны следующие данные:

ток нагрузки $I_0 = 5$ *ма*; напряжение на нагрузке $U_0 = 200$ *в*; допустимый коэффициент пульсации $K_п = 0{,}05\%$; на выходе выпрямителя, имеющего одно звено фильтра, выпрямленное напряжение $U'_0 = 240$ *в*; коэффициент пульсации $K_{п1} = 0{,}5\%$; частота пульсации $\omega_п = m\omega_c = 628$, т. е. использован двухтактный выпрямитель.

Расчет фильтра производится в следующем порядке:

1. Определяем коэффициент сглаживания RC-фильтра:

$$K_c = \frac{K_{п1}}{K_п} = \frac{0{,}5}{0{,}05} = 10.$$

2. Определяем произведение

$$R_ф C_ф = \frac{10^6 K_c}{m\omega_c} = \frac{10^6 \cdot 10}{628} = 16\,000 \textit{ ом} \cdot \textit{мкф}.$$

3. Находим допустимую величину фильтрующего сопротивления по заданным значениям тока нагрузки и напряжениям на входе и выходе фильтра:

$$R_ф = \frac{\Delta U_ф}{I_0} = \frac{U'_0 - U_0}{I_0} = \frac{240 - 200}{5 \cdot 10^{-3}} = 8\,000 \textit{ ом},$$

4. Вычисляем значение емкости конденсатора фильтра:

$$C_{ф} = \frac{R_{ф}C_{ф}}{R_{ф}} = \frac{1,6 \cdot 10^{4}}{8 \cdot 10^{3}} = 2 \text{ мкф}.$$

Рабочее напряжение конденсатора

$$U_{раб} = (1,5 - 2)\,U_0 = 300 - 400 \text{ в}.$$

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

РАСЧЕТ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

11. ПОТЕРИ В ВЫПРЯМИТЕЛЯХ

Потери в выпрямителях складываются из потерь в его отдельных элементах (силовом трансформаторе, вентиле и сглаживающем фильтре). Расчетные формулы, приведенные в табл. 18, получены в предположении, что потери в выпрямителе отсутствуют. Между тем потери в выпрямителе приведут к уменьшению выпрямленного напряжения на нагрузке, если они не будут компенсированы увеличением напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Чтобы применять расчетные формулы табл. 18, надо пользоваться значением выпрямленного напряжения с учетом падений напряжений в отдельных элементах выпрямителя. Такое напряжение, которое можно назвать напряжением холостого хода выпрямителя $U_{0x.x}$, было бы на выходе выпрямителя при отключенной нагрузке.

Напряжение холостого хода выпрямителя

$$U_{0\,x.x} = U_0 + \Delta U_{тр} + \Delta U_{в} + \Delta U_{ф},$$

где U_0 — постоянная составляющая выпрямленного напряжения на нагрузке;

$\Delta U_{тр}$ — падение напряжения на обмотках трансформатора;

$\Delta U_{в}$ — падение напряжения на вентиле;

$\Delta U_{ф}$ — падение напряжения в фильтре.

В большинстве практических случаев для технического расчета выпрямителя можно ограничиться приближенными вычислениями этих величин.

Падение напряжения на обмотках трансформатора может быть приближенно определено как

$$\Delta U_{тр} = I_0 R_{тр},$$

где R_{mp} — сопротивление обмоток каждой фазы трансформатора.

При электрическом расчете маломощных выпрямителей можно принять $\Delta U_{mp} = 5 - 15\%$ выпрямленного напряжения U_0.

Учет падения напряжения на вентилях может быть сделан на основании вольтамперных характеристик в зависимости от плотности тока вентиля, температуры окружающей среды и других условий работы вентиля. Так, например, при плотности прямого тока $\Delta I_{np} = 50$ *ма/см²* падение напряжения на каждом селеновом диоде составляет $U'_{в} = 1{,}2$ *в*. Если вентиль, используемый в данной схеме, состоит из k последовательно соединенных диодов, то падение напряжения на вентиле будет:

$$\Delta U_{в} = k \Delta U'_{в} = 1{,}2k.$$

В случае использования мостовой схемы выпрямления, в которой выпрямленный ток протекает через два последовательно соединенных вентиля, падение напряжения

$$\Delta U_{в} = 2k \Delta U'_{в}.$$

В общем случае независимо от вида используемого вентиля можно пользоваться соотношением

$$\Delta U_{в} = I_0 R_i,$$

где R_i — внутреннее сопротивление вентиля с учетом схемы выпрямления и числа последовательно соединенных вентилей.

Обратные токи в полупроводниковых вентилях почти не вызывают снижения выпрямленного напряжения, но несколько снижают к. п. д. выпрямителя. При обратных напряжениях, в 1,5—2 раза меньших, чем допустимые обратные напряжения, эти потери можно не учитывать, ибо обратные токи незначительны. При предельных значениях допустимого обратного напряжения, когда обратные токи составляют в селеновых вентилях 0,05—0,1 прямого тока, потери составляют 10—15% выпрямленной мощности. В германиевых вентилях эти потери незначительны.

Так как мощности полупроводниковых выпрямителей, используемых в радиолюбительской практике, невелики и

к. п. д. для них не имеет существенного значения, то при расчетах таких выпрямителей можно не учитывать потерь, обусловленных обратными токами (как это и сделано в приводимых ниже примерах расчета выпрямителей).

Падение напряжения в сглаживающем фильтре определяется падением постоянного напряжения на обмотке дросселя или на фильтрующих сопротивлениях. При этом имеется в виду, что конденсаторы фильтра имеют малый ток утечки. Низкокачественные электролитические конденсаторы могут иметь такой большой ток утечки, что выпрямленное напряжение заметно снижается. Обычно это является результатом перегрева конденсаторов.

Относительная величина падения напряжения в LC-фильтрах в зависимости от выпрямленной мощности определяется по графику рис. 33. Падение напряжения на обмотке дросселя фильтра

$$\Delta U_{ф} = I_0 R_{др},$$

где $R_{др}$ — активное сопротивление обмотки дросселя.

Если вместо дросселя используется фильтрующее сопротивление $R_{ф}$, как это имеет место в выпрямителях малой мощности, то величина падения напряжения на фильтре

$$\Delta U_{ф} = I_0 R_{ф},$$

а величина сопротивления $R_{ф}$ рассчитывается в зависимости от коэффициента сглаживания и емкости $C_{ф}$ (см. § 10).

Ориентировочно можно считать, что для фильтров типа RC

$$\Delta U_{ф} \approx (0{,}1 - 0{,}25)\, U_0.$$

12. РАСЧЕТ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Для расчета выпрямителя должны быть в первую очередь заданы величины выпрямленного напряжения U_0 и тока в нагрузке I_0. Эти данные могут быть получены в результате расчета тех устройств, для питания которых предназначен выпрямитель (например, генератора, приемника, усилителя и т. п.). В ряде случаев могут быть также заданы некоторые дополнительные условия работы выпрямителя,

связанные с особенностями эксплуатации питаемых устройств. К этим дополнительным условиям относятся: коэффициент пульсации выпрямленного напряжения, стабильность и возможность регулирования выпрямленного напряжения, напряжение сети переменного тока и возможные пределы изменений напряжения, пределы изменений температуры окружающей среды, длительность непрерывной работы выпрямителя и т. п. Некоторые требования, предъявляемые к выпрямителям, были приведены в табл. 1 (стр. 6).

Расчет выпрямителя сводится к выбору схемы выпрямителя и сглаживающего фильтра, к выбору типа вентилей, числа отдельных диодов и схемы их соединений, к определению электрических данных силового трансформатора и элементов сглаживающего фильтра.

Конструктивный расчет элементов схемы выпрямителя и фильтра является последующей частью вычислений и приводится в следующей главе.

Выбор типа вентилей с учетом эксплуатационных особенностей работы выпрямителя может быть сделан на основании данных табл. 2 и 17. Все расчеты независимо от типа вентилей могут быть выполнены на основании ранее изложенного материала.

Для расчета селенового выпрямителя может быть рекомендован следующий порядок.

Выбор схемы выпрямителя и сглаживающего фильтра. На основании сопоставления преимуществ и недостатков отдельных выпрямительных схем выбирается наиболее подходящая схема.

При очень малой мощности выпрямителя (меньше 20 *вт*), как правило, используют однофазную однотактную схему выпрямления.

Когда требуется получить сравнительно низкое выпрямленное напряжение при больших токах нагрузки, то применяют однофазную мостовую схему выпрямления.

При необходимости получить высокое выпрямленное напряжение при небольших токах нагрузки целесообразно применять однофазные схемы выпрямления с умножением выпрямленного напряжения.

В случае необходимости получить относительно большие токи в нагрузке при высоких значениях выпрямленного напряжения рекомендуется применять трехфазную мостовую схему выпрямления.

Выбор вентилей. Из числа имеющихся промышленных образцов подбираются размеры и число последовательно и

параллельно соединенных диодов таким образом, чтобы не превысить допустимых значений прямого тока и обратного напряжения. При этом также должны быть учтены температурные режимы использования выпрямителя.

Выбор числа параллельно соединенных вентилей может быть осуществлен в следующем порядке.

По заданному току нагрузки I_0 и выбранной схеме выпрямления определяется среднее значение тока через вентиль I_{0cp}. Если такой ток может быть пропущен через выбранный вентиль, то нет нужды в параллельном соединении нескольких вентилей. Число параллельно соединенных вентилей может быть определено из соотношения

$$n = \frac{I_{0cp}}{I'_0},$$

где I'_0 — допустимое значение тока через данный вентиль, указанное в табл. 6, 7, 8, 9, 10 или 11.

В общем случае возможно также определение числа параллельно соединенных вентилей, исходя из общей необходимой рабочей площади селенового или меднозакисного вентиля. Общая необходимая рабочая поверхность вентиля

$$S_{раб} = \frac{I_в}{\Delta I_{пр}},$$

где $I_в$ — действующее значение тока через вентиль (см. табл. 18);

$\Delta I_{пр}$ — плотность прямого тока, обычно принимаемая 50 *ма/см²*.

Число параллельно соединенных вентилей

$$n = \frac{S_{раб}}{S'_{раб}},$$

где $S'_{раб}$ — рабочая поверхность каждого вентиля.

Число последовательно соединенных диодов в каждом вентиле можно определить на основании соотношения

$$k = \frac{U_{обр}}{U'_{обр}},$$

где $U_{обр}$ — обратное напряжение на вентиле при данной схеме выпрямления (определяется по табл. 18);

$U'_{обр}$ — допустимая величина обратного напряжения на каждом вентиле (как указывалось выше, нельзя последовательно соединять германиевые диоды).

Общее число диодов, используемых в выпрямителе, определяется выражением

$$N = nkp,$$

где n — число параллельно соединенных вентилей;
k — число последовательно соединенных диодов в каждом вентиле;
p — число вентилей в схеме (в мостовой схеме $p=4$, в двухтактной схеме со средней точкой $p=2$, в однотактной схеме $p=1$).

Электрический расчет силового трансформатора. Обычно электрический расчет трансформатора является итогом расчета выпрямителя. При активной нагрузке выпрямителя расчет может быть выполнен по данным табл. 18.

Электрический расчет сглаживающего фильтра. Расчет входного конденсатора фильтра производится, как это указывалось ранее, совместно с расчетом выпрямителя. Расчет других элементов фильтра производится независимо от выпрямителя (см. § 10).

Ниже приведен ряд конкретных примеров расчета выпрямителей.

13. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Расчет селенового выпрямителя для питания цепей накала ламп.

Задано: ток нагрузки $I_0 = 6$ *а*; выпрямленное напряжение $U_0 = 6$ *в*; пульсация выпрямленного напряжения несущественна, так как имеется в виду питание накала мощных ламп.

1. Выбираем мостовую схему выпрямления без сглаживающего фильтра.

2. Пользуясь табл. 18, находим:

$$I_в = 0{,}78\, I_0 = 0{,}78 \cdot 6 = 4{,}68\ а.$$

3. Выбрав плотность прямого тока $\Delta I_{пр} = 50$ *ма/см²*, находим необходимую рабочую поверхность вентиля:

$$S_{раб} = \frac{I_в}{\Delta I_{пр}} = \frac{4{,}68}{0{,}05} = 94\ см^2.$$

4. Выбираем селеновые вентили на алюминиевой основе с размерами 75×75 *мм*, у которых рабочая поверхность

$$S'_{раб} = 0{,}9\,(7{,}5 \cdot 7{,}5) \approx 50\ см^2.$$

5. Число параллельно соединенных вентилей должно быть

$$n = \frac{S_{раб}}{S'_{раб}} = \frac{94}{50} \approx 2.$$

6. Напряжение холостого хода выпрямителя

$$U_{0\ x.x} = U_0 + \Delta U_{тр} + \Delta U_в.$$

Здесь $\Delta U_{тр} = 0{,}15 U_0 = 0{,}15 \cdot 6 = 0{,}9$ *в*.

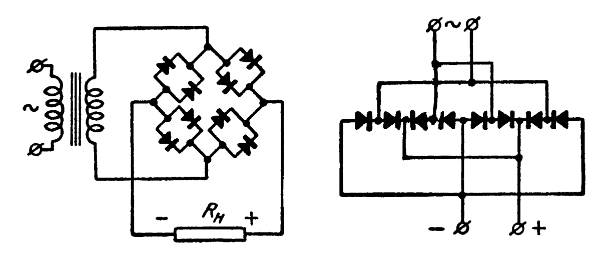


Рис. 34. Схема селенового выпрямителя для питания цепей накала ламп.

По табл. 18 находим обратное напряжение:

$$U_{обр} = 1{,}57 U_0 = 1{,}57 \cdot 6 \approx 10\ в.$$

Для выбранного типа селеновых вентилей АВС-75 допускается обратное напряжение на каждый диод $U_{обр} = 25$ *в*; следовательно, число последовательно соединенных диодов в вентиле

$$k = \frac{U_{обр}}{U'_{обр}} = \frac{10}{25} = 0{,}4.$$

Разумеется, что меньше одного диода включить последовательно нельзя. Поэтому выбираем $k = 1$. Падение напряжения на каждом диоде принимается $\Delta U'_в = 1$ *в*. При этом

$$\Delta U_в = 2k\Delta U'_в = 2 \cdot 1 \cdot 1 = 2\ в.$$

Тогда

$$U_{0\ x.x} = 6 + 0{,}9 + 2 = 8{,}9\ в.$$

7. Общее число вентилей в выпрямителе

$$N = knp = 1 \cdot 2 \cdot 4 = 8.$$

Схема выпрямителя показана на рис. 34.

8. Исходные электрические данные для расчета трансформатора определяем по табл. 18.

Действующее значение напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = 1,11\ U_{0\ x.x} = 1,11 \cdot 8,9 = 9,9\ в.$$

Действующее значение тока в обмотке трансформатора

$$I_2 = 1,11 I_0 = 1,11 \cdot 6 = 6,66\ а.$$

Коэффициент трансформации определяется в зависимости от напряжения сети. Если принять стандартное напряжение $U_c = 127\ в$,

$$K_{тр} = \frac{U_2}{U_c} = \frac{9,9}{127} = 0,078.$$

Ток первичной обмотки трансформатора с учетом тока холостого хода трансформатора будет:

$$I_1 = 1,2 K_{тр} I_2 = 1,2 \cdot 0,078 \cdot 6,66 = 0,63\ а.$$

Расчет селенового выпрямителя для питания анодной цепи лампового генератора малой мощности.

Задано: ток нагрузки $I_0 = 200\ ма$; выпрямленное напряжение $U_0 = 400\ в$.

1. Выбираем схему выпрямителя и сглаживающего фильтра.

Выбираем мостовую схему выпрямления с П-образным сглаживающим фильтром (с конденсатором на входе фильтра).

Применение двухтактной схемы выпрямления со средней точкой вторичной обмотки трансформатора в данном случае нецелесообразно из-за недостаточно хорошего использования обмоток трансформатора, что ведет к увеличению его размеров и веса. Из этих же соображений невыгодно использовать однотактную схему выпрямления, тем более, что эта схема требует увеличения сглаживающего фильтра из-за повышенной амплитуды пульсации выпрямленного напряжения и меньшей частоты пульсации.

Выбранная схема фильтра определяет емкостный характер нагрузки выпрямителя, поэтому методика данного расчета отличается от расчета предыдущего примера.

2. Определяем вспомогательный коэффициент:

$$A = \frac{\pi I_0 R_в}{m U_0'} = \frac{3,14 \cdot 0,2 \cdot 300}{2 \cdot 432} = 0,218,$$

принимая падение напряжения на фильтре 8% от U_0.

Тогда

$$U_0' = U_0 + \Delta U_ф = 400 + 32 = 432\ в.$$

Величину $R_в = 300\ ом$ выбираем ориентировочно, так как неизвестны сопротивление трансформатора и внутреннее сопротивление

вентилей; после выбора вентилей можно будет проверить эту величину.

2. Пользуясь графиками рис. 31, *а*, *б* и *в*, находим значения вспомогательных коэффициентов:

$$B = 1{,}02;\ D = 2{,}18;\ F = 6{,}22.$$

3. Действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора

$$U_2 = BU_0' = 1{,}02 \cdot 432 = 440{,}6\ \textit{в}.$$

4. Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{I_0}{m} D \sqrt{2} = \frac{200}{2} 2{,}18 \sqrt{2} = 308\ \textit{ма}.$$

5. Максимальное значение тока через вентиль

$$I_{макс} = \frac{I_0}{m} F = \frac{200}{2} 6{,}62 = 662\ \textit{ма}.$$

6. Коэффициент трансформации (при $U_c = 127$ *в*)

$$K_{тр} = \frac{U_2}{U_c} = \frac{440{,}6}{127} = 3{,}47.$$

7. Действующее значение тока первичной обмотки с учетом тока холостого хода трансформатора

$$I_1 = 1{,}2 I_2 K_{тр} = 1{,}2 \cdot 0{,}308 \cdot 3{,}47 = 1{,}28\ \textit{а}.$$

8. Выбираем вентиль по току.

Так как среднее значение выпрямленного тока в плече мостовой схемы составляет в данном случае $\frac{I_0}{2} = 100$ *ма*, то подходящими являются вентили типа ВС-35 с допустимым выпрямленным током 0,15 *а* и с допустимым обратным напряжением 21 *в* (амплитудное значение).

9. Определяем обратное напряжение, приложенное к одному вентилю мостовой схемы:

$$U_{обр} = 1{,}41\,U_2 = 1{,}41 \cdot 440{,}6 = 620\ \textit{в}.$$

10. Число последовательно соединенных диодов типа ВС-35 должно быть

$$k = \frac{U_{обр}}{U'_{обр}} = \frac{620}{21} \approx 30.$$

11. Общее число диодов типа ВС-35

$$N = knp = 30 \cdot 1 \cdot 4 = 120.$$

12. Проверяем выбранное значение сопротивления $R_в$:

Сопротивление

$$R_{тр} = k\,\frac{U_0}{I_0 \sqrt[4]{I_0 U_0}} = 0{,}15\,\frac{400}{0{,}2\sqrt[4]{0{,}2 \cdot 400}} = 100\ \textit{ом}.$$

Внутреннее сопротивление двух последовательно включенных вентилей

$$R_i = 2kR_i' = 2 \cdot 30 \cdot 4 = 240 \text{ ом},$$

полагая при этом внутреннее сопротивление каждого из диодов

$$R_i' = \frac{\Delta U'_в}{I_{0\,ном}} = \frac{0,6}{0,15} = 4 \text{ ом}.$$

Тогда

$$R_в = R_{тр} + R_i' = 100 + 240 = 340 \text{ ом},$$

т. е. почти совпадает с ранее принятым значением 300 *ом*.

13. Электрический расчет фильтра производится в том же порядке, как и в примере расчета на стр. 69.

Расчет бестрансформаторного выпрямителя малой мощности с удвоением напряжения.

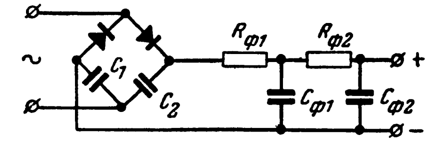


Рис. 35. Схема выпрямителя с удвоением напряжения.

Задано: ток нагрузки $I_0 = 10$ *ма*; выпрямленное напряжение на нагрузке $U_0 = 220$ *в*. Выпрямитель предназначается для питания анодных цепей радиоприемника „Родина". Питание выпрямителя производится от сети переменного тока с напряжением 127 — 220 *в* и частотой 50 *гц*.

1. Выбираем схемы выпрямителя и сглаживающего фильтра.

Из табл. 1 видно, что при указанной нагрузке выпрямителя коэффициент пульсации $K_п$ не должен превышать 0,1%. Поэтому выбираем двухтактную схему выпрямления с удвоением напряжения и с двухзвенным *RC*-фильтром. Схема выпрямителя показана на рис. 35.

Выбор схемы удвоения обусловлен необходимостью получить выпрямленное напряжение почти вдвое больше напряжения сети без применения силового трансформатора. Расчет ведется для напряжения сети 127 *в*. При напряжении сети 220 *в* должно быть включено добавочное сопротивление $R_д$, не показанное на схеме.

При определении расчетных коэффициентов и выпрямленного напряжения следует обязательно учесть падение напряжения на фильтрующих сопротивлениях сглаживающего фильтра.

2. Примем падение напряжения в сглаживающем фильтре $\Delta U_ф = 45$ *в*.

3. Имея в виду использовать селеновые диоды малых размеров, зададимся ориентировочной величиной сопротивления $R_в = 500$ *ом*.

4. Определяем вспомогательный коэффициент:

$$A = \frac{2\pi I_0 R_в}{mU_0'} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 600}{1\,(220 + 45)} = 0,14.$$

5. По графикам рис. 31, *а*, *б* и *в* находим:

$$B = 0,94;\ D = 2,32;\ F = 7.$$

6. По полученным коэффициентам находим:

$$U_2 = 0{,}5\,BU'_0 = 0{,}5\cdot 0{,}94\cdot 265 = 124\ в \approx 127\ в;$$

$$I_2 = DI_0\sqrt{2} = 2{,}32\cdot 10\cdot 1{,}41 = 32{,}8\ ма;$$

$$I_{в\ макс} = FI_0 = 7\cdot 10 = 70\ ма.$$

При выборе вентилей среднее значение выпрямленного тока за счет емкостного характера нагрузки следует увеличить до $1{,}2\,I_0 = 1{,}2\cdot 10 = 12$ *ма*.

7. По графику рис. 31, *г* находим значение коэффициента $H=300$ (при $m=1$) и, задаваясь коэффициентом пульсации на входе сглаживающего фильтра $K_{п1} = 10\%$, находим емкость конденсатора каждого плеча схемы:

$$C_1 = C_2 = \frac{H\cdot 100}{K_{п1}R_в} = \frac{300\cdot 100}{10\cdot 600} = 5\ мкф.$$

Берем ближайшую стандартную величину емкости $C_1 = 4$ *мкф* и определяем коэффициент пульсации на входе фильтра:

$$K_{п1} = \frac{H}{C_1R_в} = \frac{300}{4\cdot 600} = 0{,}125.$$

8. Коэффициент сглаживания фильтра

$$K_c = \frac{K_{п1}}{K_п} = \frac{0{,}125}{0{,}001} = 125,$$

или $K_{c1} = K_{c2} = 11{,}2$ на каждое звено фильтра.

9. Элементы каждого звена фильтра определяются следующим образом:

$$R_ф C_ф = \frac{10^6 K_{c1}}{m\omega_c} = \frac{10^6\cdot 11{,}2}{2\cdot 2\cdot 3{,}14\cdot 50} = 18\,000\ ом\cdot мкф.$$

Падение напряжения на каждом звене фильтра при полном падении в фильтре $\Delta U_ф = 45$ *в* равно 22,5 *в*.

Допустимая величина фильтрующего сопротивления

$$R_ф = \frac{0{,}5\Delta U_ф}{I_0} = \frac{22{,}5}{10\cdot 10^{-3}} = 2\,250\ ом.$$

Емкость каждого звена фильтра

$$C_ф = \frac{R_ф C_ф}{R_ф} = \frac{18\,000}{2\,250} = 8\ мкф.$$

9. Обратное напряжение на вентиле

$$U_{обр} = 2\sqrt{2}\,U_2 = 2\sqrt{2}\cdot 127 = 360\ в.$$

10. Из селеновых вентилей возможно использовать два наиболее подходящих типа: АВС-6 (см. табл. 7) — по два диода в плече, соединенных параллельно, или ТВС-18 (см. табл. 10). Последний пред-

почтительнее использовать из соображений более высокого допустимого обратного напряжения ($U'_{обр} = 36$ *в*).

Выбираем ТВС-18.

11. Число последовательно соединенных диодов в вентиле

$$k = \frac{U_{обр}}{U'_{обр}} = \frac{360}{36} = 10.$$

Общее число диодов в выпрямителе

$$N = knp = 10 \cdot 1 \cdot 2 = 20.$$

Если применить вентили АВС-6 — по два в плече, то потребуется всего диодов

$$N = knp = \frac{360}{25} 2 \cdot 2 = 58.$$

Если учесть не только увеличение общего числа диодов в выпрямителе, но и их большое внутреннее сопротивление (превышающее принятую в расчете величину $R_в = 600$ *ом*), то предпочтение должно быть отдано диодам ТВС-18.

ГЛАВА ПЯТАЯ

КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ДРОССЕЛЕЙ

Конструктивному расчету маломощных трансформаторов и дросселей сглаживающих фильтров посвящено большое количество книг и статей. В зависимости от требуемой степени точности расчета можно воспользоваться одним из известных методов расчета. В ряде случаев можно ограничиться приближенным расчетом, который не очень сложен и оправдывает себя на практике.

14. КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Исходной величиной для конструктивного расчета является расчетная мощность трансформатора:

$$P_{тр} = \frac{m_1 I_1 U_1 + m_2 I_2 U_2}{2} + 1{,}05\,(I_3 U_3 + I_4 U_4 + \ldots),$$

где m_1 — число фаз первичной обмотки;
m_2 — число фаз вторичной обмотки;
I_3, I_4 и U_3, U_4 — токи и напряжения вспомогательных (накальных) обмоток.

Для простейшего трансформатора, имеющего только первичную и вторичную обмотки, расчетную мощность можно определить по данным табл. 20.

Таблица 20

Схемы выпрямления	Однофазная однотактная	Однофазная двухтактная	Однофазная мостовая	Двухтактная с удвоением напряжения
Расчетная мощность трансформатора $P_{тр}$, *ва*	$0{,}95 I_2 U_2$	$1{,}7 I_2 U_2$	$I_2 U_2$	$I_2 U_2$.

Значения тока I_2 и напряжения U_2 берутся из расчета выпрямителя. Если трансформатор одновременно используется для питания нескольких выпрямительных схем, то

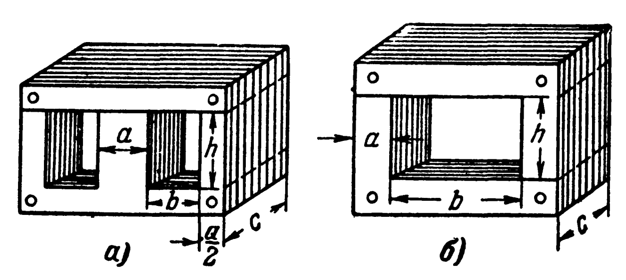


Рис. 36. Сердечники трансформаторов.
а — броневой; *б* — стержневой.

общая расчетная мощность трансформатора определяется как сумма расчетных мощностей для каждой схемы.

Сердечники трансформаторов обычно выполняются из листовой трансформаторной стали Э41 (Э4А) или Э42 (Э4АА) толщиной 0,35 или 0,5 *мм*. Эти стали содержат до 5% кремния, что обеспечивает уменьшение потерь на вихревые токи. Из соображений уменьшения потерь в стали сердечника отдельные пластины изолируются между собой тонким слоем лака или бумаги.

Более высокими магнитными свойствами обладает сталь ХВП (холоднокатанная высокой проницаемости). Однако применение этой стали ограничивается ее достаточно высокой стоимостью и некоторыми технологическими особенностями изготовления сердечников из стали ХВП.

Существуют два типа сердечников для трансформаторов: стержневой и броневой (рис. 36). Основными размерами сердечников являются:

1. Активное сечение стали сердечника

$$Q_c = ack_c,$$

где коэффициент k_c учитывает толщину изоляции между отдельными пластинами, из которых набран сердечник ($k_c = 0{,}9$—$0{,}95$).

2. Площадь окна сердечника для размещения обмотки

$$Q_o = bh.$$

3. Длина магнитных силовых линий в сердечнике:

$l_c = 2(b + h) + 1{,}57\ a$ — для броневого сердечника;

$l_c = 2(b + h) + 3{,}14\ a$ — для стержневого сердечника.

При выборе размеров сердечника можно исходить из соотношения

$$Q_c Q_o = 1{,}6 P_{тр}.$$

Это соотношение получено для магнитной индукции $B = 10\,000$ *гс* в сердечнике из стали марки Э41 или Э42 толщиной не более 0,5 *мм* и для проводов с эмалевой изоляцией (типа ПЭЛ). Если же приходится использовать провод с шелковой изоляцией (ПШД или ПЭШО), то надо брать

$$Q_c Q_o = (2 - 2{,}3)\, P_{тр}.$$

Для сборки сердечника трансформатора броневого типа используют Ш-образные пластины. Данные о некоторых типовых Ш-образных пластинах приведены в табл. 21.

Определение числа витков каждой обмотки трансформатора можно сделать на основании соотношения

$$U = 4{,}44 f_c w B Q_c \cdot 10^{-8},$$

где f — частота сети;

w — число витков обмотки;

B — индукция в сердечнике.

Если принять индукцию в сердечнике $B = 10\,000$ *гс* и $f = 50$ *гц*, то можно пользоваться следующим соотношением для определения числа витков первичной обмотки:

$$w_1 = 48 \frac{U_1}{Q_c}.$$

Таблица 21

Размеры некоторых Ш-образных пластин

Тип пластин	Размеры					Пределы величин	
	a, *см*	b, *см*	h, *см*	Q_O, *см*^{2}	l_c, *см*	Q_cQ_O, *см*^{4}	Q_cl_c, *см*^{3}
Ш-10	1	0,5	1,5	0,75	5,57	0,75—1,5	5,6—11,2
Ш-10	1	0,65	1,8	1,17	6,47	1,2—2,4	6,5—13
Ш-11	1,1	1,15	3,4	3,9	10	4,7—9,4	12—24
Ш-12	1,2	0,6	1,8	1,08	5,7	1,56—3,12	8—16
Ш-12	1,2	1,2	2,6	3,12	9,5	4,5—9,0	13,5—26
Ш-12	1,2	1,6	4,8	7,68	14,7	11—22	21—42
Ш-14	1,4	0,7	2,1	1,47	7,8	2,9—5,8	15—30
Ш-14	1,4	0,9	2,5	2,25	9,0	4,3—8,6	18—36
Ш-15	1,5	1,35	2,7	3,65	10	8,2—16,4	22,5—45
Ш-16	1,6	0,8	2,4	1,92	8,9	4,9—9,8	23—46
Ш-18	1,8	0,9	2,7	2,43	10	7,9—15,8	32,5—65
Ш-19	1,9	1,7	4,6	7,82	15,6	28—56	56—112
Ш-20	2,0	1,8	5,6	10,1	17,9	40—80	71—142
Ш-21	2,1	1,9	3,8	7,22	14,7	32—64	65—130
Ш-22	2,2	1,4	3,9	5,46	14,06	26—52	68—136
Ш-24	2,4	1,2	3,6	4,32	13,4	25—50	77—154
Ш-25	2,5	3,15	5,8	18,3	21,76	114—228	136—272
Ш-26	2,6	1,7	4,7	7,99	16,9	54—108	114—228
Ш-28	2,8	2,35	5	11,8	19,1	92,5—185	150—300
Ш-30	3	2,7	5,4	14,6	20,9	131—262	190—380
Ш-32	3,2	3,6	7,2	25,9	26,6	265—530	270—540
Ш-35	3,5	2,2	6,15	13,5	22,2	165—330	270—540
Ш-40	4	3	7	21	26,3	336—672	420—840

Указанные в таблице пределы величин Q_cQ_O и Q_cl_c получены при толщине набора (пакета) $c = (1-2)\ a$.

Число витков вторичных обмоток можно определить из выражения

$$w_2 = 52\frac{U_2}{Q_c}.$$

Выбор диаметра проводов обмоток может быть сделан, исходя из плотности тока около 2,5 *а/мм*^{2}.

Пример расчета трансформатора.

Задано: Рассчитать трансформатор для однофазной двухтактной схемы выпрямителя по следующим данным:

$$U_1 = 110\ в;\ U_2 = 2\times 288\ в;\ U_3 = 6{,}3\ в;\ I_1 = 628\ ма;\ I_2 = 96\ ма;$$
$$I_3 = 2\ а.$$

1. Пользуясь табл. 20, находим:

$$P_{mp} = 1{,}7 I_2 U_2 + 1{,}05 I_3 U_3 = 1{,}7\cdot 0{,}096\cdot 288 + 1{,}05\cdot 6{,}3\cdot 2 = 60{,}25\ ва.$$

2. Ориентируясь на применение провода ПЭЛ, находим:

$$Q_c Q_o = 1{,}6 P_{mp} = 1{,}6 \cdot 60{,}25 = 96{,}5 \text{ см}^4.$$

3. Пользуясь данными табл. 21, выбираем пластины Ш-25 с $Q_o = 18{,}3$ $см^2$. Тогда

$$Q_c = \frac{96{,}5}{Q_o} = \frac{96{,}5}{18{,}5} = 5{,}3 \text{ см}^2$$

и при $k_c = 0{,}95$ толщина набора

$$c = \frac{Q_c}{k_c a} = \frac{5{,}3}{0{,}95 \cdot 2{,}5} = 2{,}24 \text{ см}.$$

4. Число витков обмоток:

$$w_1 = 48 \frac{U_1}{Q_c} = \frac{48 \cdot 110}{5{,}3} = 995; \; w_2 = 2 \times 52 \frac{U_2}{Q_c} =$$

$$= 2 \times \frac{52 \cdot 288}{5{,}3} = 2 \times 2\,820; \; w_3 = 52 \frac{U_3}{Q_c} = 52 \frac{6{,}3}{5{,}3} = 62.$$

5. Диаметры проводов обмоток:

$$d_1 = 0{,}7 \sqrt{I_1} = 0{,}7 \sqrt{0{,}628} = 0{,}55 \text{ мм}; \; d_2 = 0{,}7 \sqrt{I_2} = \sqrt{0{,}096} = 0{,}22 \text{ мм};$$

$$d_3 = 0{,}7 \sqrt{I_3} = 0{,}7 \sqrt{2} = 1 \text{ мм}.$$

Между сетевой обмоткой и вторичными обмотками рекомендуется проложить один слой витков, которые являются экраном. Один из выводов этой обмотки заземляется. Диаметр провода экранной обмотки не имеет существенного значения и может быть выбран небольшим.

15. КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ДРОССЕЛЯ СГЛАЖИВАЮЩЕГО ФИЛЬТРА

Исходной величиной для конструктивного расчета дросселя сглаживающего фильтра служит значение LI_0^2, где L — индуктивность дросселя, а I_0 — ток через дроссель. Эта величина определяет с достаточной степенью точности объем сердечника, равный $Q_c l_c$. Зависимость между этими двумя величинами показана на графике, приведенном на рис. 37.

Определив по графику рис. 37 произведение $Q_c l_c$ по заданной исходной величине LI_0^2, можно выбрать стандартный размер сердечника по данным табл. 21.

Как правило, сердечник дросселя собирается с воздушным зазором. Дроссель с зазором при наличии под-

магничивающего тока I_0 имеет бо́льшую индуктивность, чем дроссель без зазора.

Наивыгоднейшая длина воздушного зазора

$$l_в = l_c \frac{l_в\%}{100},$$

где $l_в\%$ зависит от величины $M = \frac{LI_0^2}{Q_c l_c}$ и определяется по графику рис. 38.

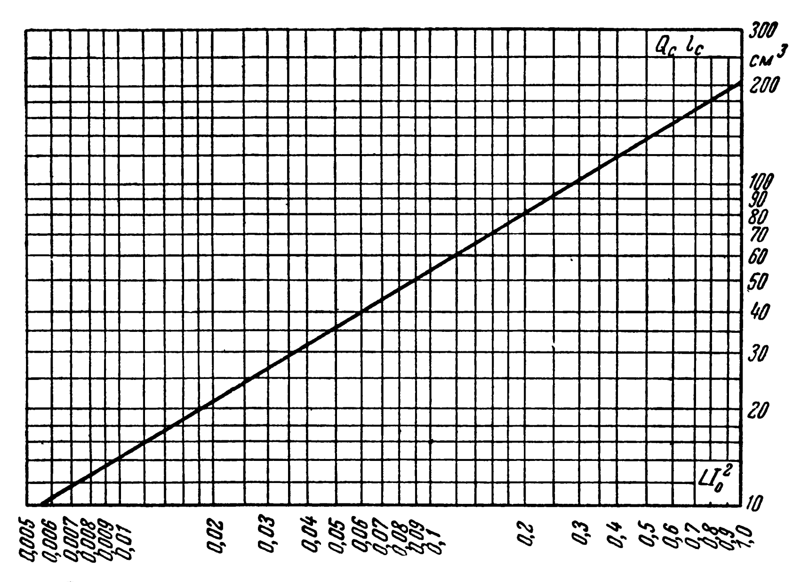


Рис. 37. График для выбора сердечника дросселя фильтра.

Требуемый воздушный зазор создается между Ш-образными и замыкающими пластинами при помощи изоляционной прокладки толщиной $0{,}5 l_в$.

Расчет обмотки дросселя сводится к определению числа витков, выбору диаметра провода и проверке размещения обмотки в окне выбранного сердечника.

Число витков дросселя

$$w = 10^4 \sqrt{\frac{L l_c}{1{,}26 \mu_z Q_c}},$$

где μ_z — магнитная проницаемость стали с учетом наивыгоднейшего воздушного зазора, определяемая

для сталей марок Э41 и Э42 по графику рис. 39 в зависимости от вспомогательной величины M.

Выбор диаметра провода обмоток дросселя может быть сделан, исходя из допустимой плотности тока 3—4 *а/мм²*:

$$d = (0{,}55-0{,}65)\sqrt{I_0},$$

где I_0 — ток, *а*.

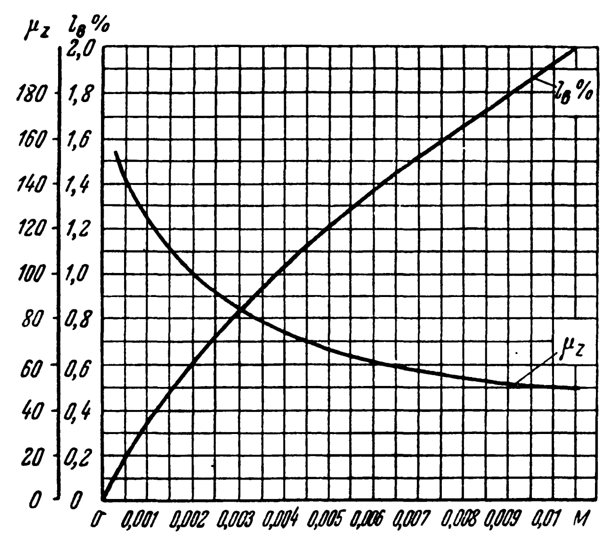


Рис. 38. Графики для определения длины воздушного зазора и магнитной проницаемости сердечника дросселя.

Проверка размещения обмотки определяется неравенством

$$100\,Q_0 k_м \geq 0{,}8 w d^2,$$

где $k_м = 0{,}25 - 0{,}35$ — коэффициент заполнения окна сердечника обмоткой.

Сопротивление обмотки дросселя

$$R_{др} = \frac{225 w l_м}{d^2 \cdot 10^6},$$

где $l_м$ — средняя длина витка обмотки, *см*.

Для обмотки, выполненной на Ш-образном сердечнике,

$$l_м = 2(a + c) + \pi b.$$

Пример расчета дросселя.

Задано: индуктивность дросселя $L = 15$ *гн*; ток нагрузки $I_0 = 80$ *ма*.

1. Определяем

$$LI_0^2 = 15 \cdot 0{,}08^2 = 0{,}096.$$

2. По графику рис. 37 находим:

$$Q_c l_c = 54 \text{ см}^3.$$

3. По табл. 21 выбираем пластины типа Ш-18 с $l_c = 10$ *см*.
4. Находим сечение сердечника:

$$Q_c = \frac{Q_c l_c}{l_c} = \frac{54}{10} = 5{,}4 \text{ см}^2.$$

Толщина пакета

$$c = \frac{Q_c}{k_c a} = \frac{5{,}4}{0{,}95 \cdot 1{,}8} = 3{,}16 \text{ см} \approx 3{,}2 \text{ см}.$$

5. Находим вспомогательный коэффициент

$$M = \frac{LI_0^2}{Q_c l_c} = \frac{0{,}096}{54} = 0{,}00178.$$

По графику рис. 38

$$l_в\% = 0{,}58\% \text{ и } \mu_z = 102.$$

6. Длина воздушного зазора

$$l_в = l_c \frac{l_в\%}{100} = 10 \frac{0{,}58}{100} \approx 0{,}06 \text{ см} = 0{,}6 \text{ мм}.$$

Толщина прокладки $0{,}5 l_в = 0{,}3$ *мм*.

7. Число витков дросселя

$$w = 10^4 \sqrt{\frac{Ll_c}{1{,}26 \mu_z Q_c}} = 10^4 \sqrt{\frac{15 \cdot 10}{1{,}26 \cdot 102 \cdot 5{,}4}} = 4\,650 \text{ витков}.$$

8. Диаметр провода обмотки

$$d = 0{,}55 \sqrt{I_0} = 0{,}55 \sqrt{0{,}08} \approx 0{,}15 \text{ мм}.$$

Берем ближайший стандартный диаметр провода ПЭЛ.

9. Проверяем размещение обмотки по неравенству

$$100 Q_0 k_м \geqslant 0{,}8 w d^2,$$

где для выбранной пластины $Q_o = 2{,}43$ *см*². Подставив числа, получим:

$$100 \cdot 2{,}43 \cdot 0{,}35 > 0{,}8 \cdot 4\,650 \cdot 0{,}15^2,$$

или $85 > 84$, т. е. обмотка размещается.

10. Активное сопротивление обмотки дросселя

$$R_{\partial p} = \frac{225 w l_м}{d^2 \cdot 10^6} = \frac{225 \cdot 4\,650 \cdot 13}{0{,}15^2 \cdot 10^6} = 600 \text{ ом},$$

где средняя длина витка обмотки

$$l_м = 2(a + c) + \pi b = 2(1{,}8 + 3{,}2) + 3{,}14 \cdot 0{,}9 \approx 13 \text{ см}.$$

11. Падение напряжения на дроссель

$$\Delta U_ф = I_0 R_{\partial p} = 0{,}08 \cdot 600 \approx 50 \text{ в}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полупроводниковые вентили находят в настоящее время весьма широкое применение. То обстоятельство, что полупроводниковые диоды начинают изготавливаться на все более высокие значения допустимого обратного напряжения при малых величинах обратного тока, с широкими пределами рабочих температур, в малых габаритах и с малой собственной емкостью, сделает возможным широкую замену двухэлектродных электронных и ионных приборов полупроводниковыми.

Сейчас уже широко используются селеновые вентили типов ВС, АВС, ТВС, а также германиевые диоды. Начинают входить в употребление кремниевые диоды. Широкое внедрение магнитных усилителей немыслимо без применения полупроводниковых выпрямителей, являющихся составной частью этих усилителей. То же самое можно сказать о ряде других радиотехнических устройств, где малые габариты, вес и высокая экономичность являются важнейшими требованиями.

Полупроводники находят применение и в мощных силовых устройствах. Так, например, в литературе описан опытный выпрямитель мощностью 750 *квт* с 600 параллельно включенными германиево-индиевыми диодами, имеющий к. п. д. около 97%. Такой выпрямитель используется для питания двигателей электропоезда. Известно также описание мощного сварочного агрегата, питаемого от сети переменного тока через германиево-индиевый выпрямитель, что обеспечивает значительное увеличение к. п. д. и уменьшение веса и габаритов установки.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ БЕЗ ПОТЕРЬ С ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ (ФИЛЬТР НАЧИНАЕТСЯ С ИНДУКТИВНОСТИ)

Определяемая величина и ее обозначение	Схемы выпрямления				
	Однотактные		Двухтактные		
	Трехфазная	Шестифазная	Со средней точкой	Однофазный мост	Трехфазный мост
Постоянная составляющая выпрямленного напряжения U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0
Действующее значение напряжения на фазе вторичной обмотки трансформатора U_2	$0{,}855U_0$	$0{,}74U_0$	$1{,}11U_0$	$1{,}11U_0$	$0{,}43U_0$ (звезда) $0{,}74U_0$ (треугольник)
Наибольшее (амплитудное) значение обратного напряжения, приложенное к вентилю $U_{обр.\ макс}$	$2{,}1U_0$	$2{,}1U_0$	$3{,}14U_0$	$1{,}57U_0$	$1{,}05U_0$
Амплитуда переменной составляющей выпрямленного напряжения $U_{п.\ макс}$	$0{,}25U_0$	$0{,}06U_0$	$0{,}67U_0$	$0{,}67U_0$	$0{,}06U_0$
Частота пульсации выпрямленного напряжения $f_п$ (*гц*) при частоте сети 50 *гц*	150	300	100	100	300
Действующее значение тока через вентиль $I_в$	$0{,}58I_0$	$0{,}41I_0$	$0{,}71I_0$	$0{,}71I_0$	$0{,}58I_0$

Продолжение

Определяемая величина и ее обозначение	Схемы выпрямления				
	Однотактные		Двухтактные		
	Трехфазная	Шестифазная	Со средней точкой	Однофазный мост	Трехфазный мост
Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора I_2	$0,58I_0$	$0,41I_0$	$0,71I_0$	I_0	$0,82I_0$ (звезда) $0,47I_0$ (треугольник)
Действующее значение тока первичной обмотки трансформатора I_1 без учета тока холостого хода	$0,47K_{тр}I_0$	$0,47K_{тр}I_0$ (звезда) $0,58K_{тр}I_0$ (треугольник)	$K_{тр}I_0$	$K_{тр}I_0$	$K_{тр}I_2$
Коэффициент использования вторичной обмотки трансформатора $k_2 = \frac{U_0 I_0}{U_2 I_2 m_2}$	0,67	0,55	0,64	0,9	0,95
Коэффициент использования первичной обмотки трансформатора $k_1 = \frac{U_0 I_0}{U_1 I_1 m_1}$	0,83	0,95 (звезда) 0,78 (треугольник)	0,9	0,9	0,95

Примечания: 1. $K_{тр} = \frac{w_2}{w_1} \approx \frac{U_2}{U_1}$ (коэффициент трансформации).

2. Соотношения токов и напряжений действительны при любой частоте питающего напряжения.
3. m_1 — число фаз первичной обмотки трансформатора.
4. m_2 — число фаз вторичной обмотки трансформатора.

5. Индуктивность дросселя фильтра должна быть: $L \geqslant \frac{U_0}{m f_c I_0}$.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СЕЛЕНОВЫХ ДИОДОВ ТИПОВ ВС И АВС

Наружный диаметр селеновых дисков, *мм*	5	7,2	18	25 *	35	45 *	100	Квадратные пластины, *мм*			
								60×60	75×75 *	90×90	100×100 *
Максимально допустимый выпрямленный ток $I_{0\,доп}$, *ма* .	1,2	6	40	75	150	300	1 500	600	1 200	1 500	2 000
Внутреннее сопротивление 1 диода R_i', *ом*	300	90	15	5	2,5	1,2	0,15	0,5	0,25	0,15	0,12

Примечания: 1. Максимально допустимая амплитуда обратного напряжения 25 *в* на 1 диод.

2. Внутреннее сопротивление диода, указанное в таблице $\left(R_i'\right)$, соответствует максимально допустимому выпрямленному току $I_{0\,доп}$. Если выпрямленный ток I_0 меньше $I_{0\,доп}$, то внутреннее сопротивление диода R_i можно определить по приближенной формуле

$$R_i = R_i' \sqrt{\frac{I_{0\,доп}}{I_0}}.$$

3. Внутреннее сопротивление изготовляемых диодов типа ТВС (отмечены знаком *) приблизительно в 1,5 раза больше указанного в таблице.

ЛИТЕРАТУРА

А. Д. Азатьян и С. А. Толкачева, Германиевые диоды ДГ-Ц, Госэнергоиздат, 1955.

С. Н. Гаврилов, Полупроводниковые электронные приборы, Изд. ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1956.

А. Ф. Иоффе, Полупроводники и их применение, Изд. АН СССР, 1956.

И. А. Казаринов, Селеновые выпрямители для предприятий связи, Связьиздат, 1952.

К. Б. Мазель, Стабилизаторы напряжения и тока, Госэнергоиздат, 1955.

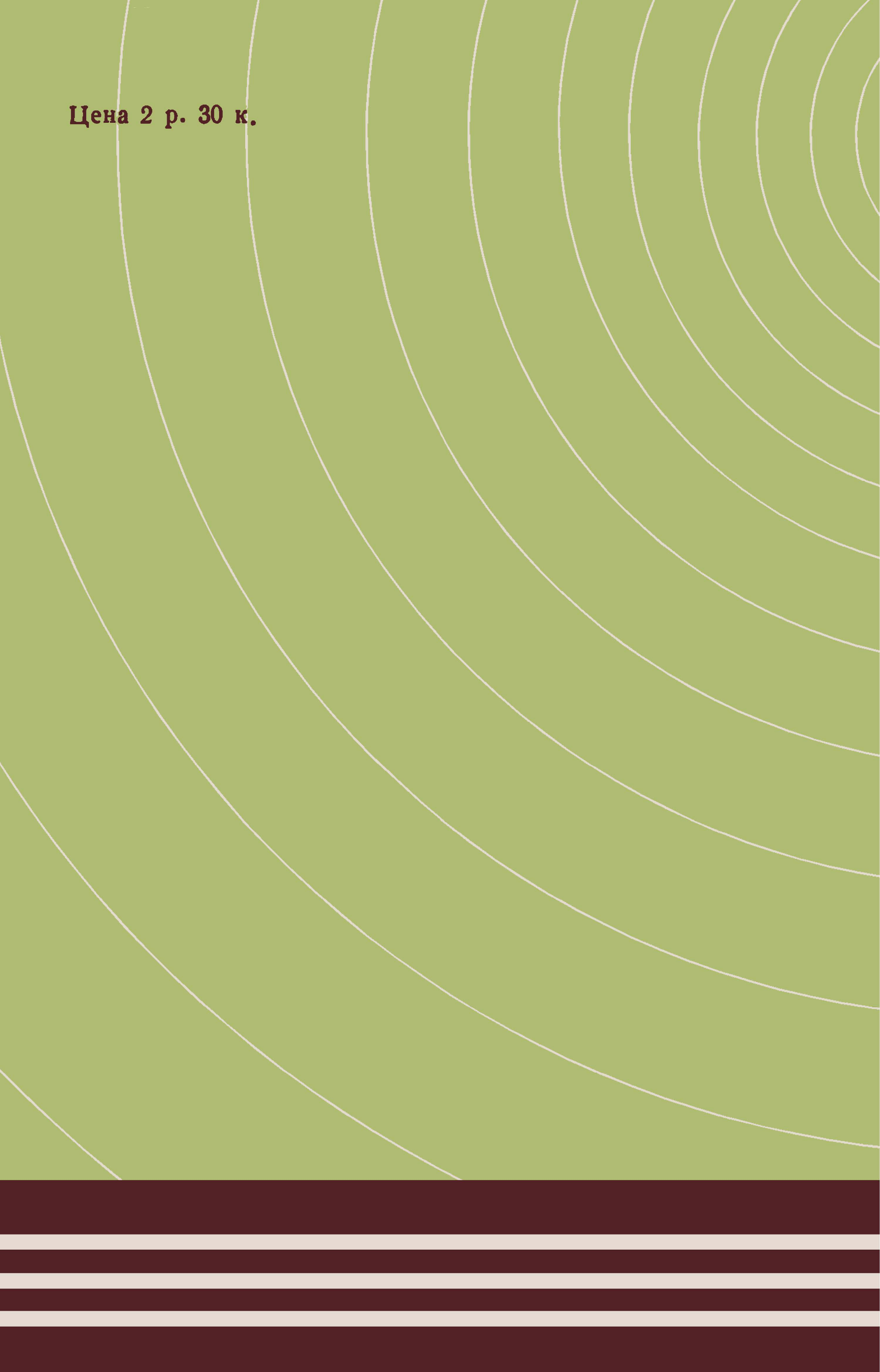
И. Н. Осколков и Ф. Ф. Соколов, Селеновые выпрямители, изд. „Искусство", 1955.

М. С. Соминский, Полупроводники и их применение, Госэнергоиздат, 1955.

Справочник радиолюбителя, Госэнергоиздат, 1955.

Б. П. Терентьев, Электропитание радиоустройств, Связьиздат, 1948.

СОДЕРЖАНИЕ


Цена 2 р. 30 к.